



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

Estudio de la demanda de Sr para la modificación eutéctica de las
aleaciones 355.0 y 357.0 coladas en molde permanente

Tesis

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

Juan Pablo Rubén Bustamante García

CDMX.

AÑO 2019





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: José Alejandro García Hinojosa
VOCAL: Profesor: Adrián Manuel Amaro Villeda
SECRETARIO: Profesor: Balbina Ojeda Ramírez
1° SUPLENTE: Profesor: Luis Darío Escobar Mejía
2° SUPLENTE: Profesor: Héctor Israel Quiroga Herrera

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Facultad de Química, UNAM
Edificio D, Laboratorio de Fundición

Asesor del tema:

José Alejandro García Hinojosa

SUSTENTANTE

Juan Pablo Rubén Bustamante García



Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme acogido desde el primer día de mi estancia a nivel bachillerato, hasta el último día a nivel licenciatura. La Facultad de Química en particular me brindó todos los conocimientos científicos necesarios para comenzar a desarrollar mi vida profesional, sin embargo, también adquirí y desarrollé los valores de la entidad, los cuales me ayudan a continuar mi formación día con día.

De los laboratorios de fundición e ingeniería en materiales, me gustaría agradecer particularmente al Doctor Alejandro García Hinojosa, por haberme brindado un impulso para comenzar mi carrera profesional fuera de las instalaciones académicas y por apoyarme en el planteamiento, desarrollo y conclusión de mi proyecto para titulación.

Al Doctor Adrián Manuel Amaro Villeda, por ser una parte fundamental para la conclusión del proyecto, brindándome apoyo en el análisis químico que se ve reflejado en el presente documento.

A la profesora Balbina por siempre apoyarme al resolver dudas académicas y profesionales, además de brindarme sus comentarios para la correcta finalización de mi licenciatura.

A la empresa MARCO METALES S. de R.L. de C.V. por brindarme la aleación Aluminio – Estroncio con la cual se realizó la presente tesis, en especial a Mónica Treviño y al Ingeniero Nemesio Baeza, por acogerme en la compañía y brindarme herramientas y conocimientos que en ningún otro lugar podría haber desarrollado.



Índice

Capítulo I

Introducción.....	6
1.1) Hipótesis.....	6
1.2) Objetivo.....	6

Capítulo II

El Aluminio	7
2.1) Producción de Aluminio.....	8
2.2) El aluminio secundario.....	9
2.3) Propiedades del Aluminio.....	10
2.4) Aspectos económicos de la industria del Aluminio.....	10
2.5) Reciclaje del Aluminio.....	11

Capítulo III

Procesos de fundición de piezas de Aluminio.....	13
3.1) Aleaciones para fundición.....	13
3.2) Efectos de principales elementos aleantes.....	14
3.3) Aleaciones Aluminio – Silicio.....	15
3.4) Solidificación de aleaciones de aluminio.....	16
3.5) Control microestructural.....	16
3.6) Procesos de fundición en molde permanente.....	20
3.7) Aleaciones eutécticas Al – Si.....	23
3.8) Mecanismo de modificación.....	24
3.9) Aleaciones de la serie 3xx.x.....	28

Capítulo IV

Procedimiento Experimental.....	30
4.1) Fabricación de aleaciones 355 y 356.....	30
4.2) Colada de blancos y aleaciones modificadas.....	30



4.3) Preparación metalográfica.....	33
Capítulo V	
Presentación y discusión de resultados	37
5.1) Presentación de resultados	37
5.2) Discusión de resultados	51
5.3) Análisis económico	62
Capítulo VI	
Conclusiones.....	65
Referencias bibliográficas	66
Anexo I	68
Anexo II	69
Anexo III	70



Capítulo I

Introducción.

En la industria del aluminio los tratamientos del metal líquido son de vital importancia para poder obtener las propiedades mecánicas deseadas en la pieza final, estos tratamientos desempeñan un papel fundamental en la fabricación de piezas sumamente especiales para industrias especializadas como la aeronáutica o aeroespacial, en la cual, no existe margen de error para que la pieza falle. Dentro de los tratamientos del metal líquido más importante se encuentran “Refinamiento de grano” y “Modificación de la fase eutéctica”. La primera de ellas se lleva a cabo generalmente en colada en arena en verde, en la cual la pieza obtenida posee una solidificación “lenta”, lo que genera un crecimiento de grano que repercute en las propiedades mecánicas finales; para poder obtener un tamaño de grano fino se utilizan aleaciones maestras (Generalmente Al-Ti-B, antes se usaban sales como el NaCl). Para el tratamiento del metal líquido de modificación de la fase eutéctica (α Al+ Si), se utiliza usualmente “Estroncio” en lingotes cuando el horno posee grandes dimensiones (Por encima de las 30 Toneladas) o existen máquinas alimentadoras de “Varilla” de aleación, la cual la va cortando de acuerdo al requerimiento, con base en el análisis químico preliminar, que el ingeniero de proceso haya realizado.

El aluminio, dada su alta importancia actualmente en la industria, ha tenido grandes avances tecnológicos en los últimos años para poder controlar y mejorar los procesos de su obtención y procesamiento, para tener componentes de mejor calidad fabricados de aleaciones de aluminio, en particular los procesos de fundición tal como se constata en el contenido de cada capítulo.

1.1) Hipótesis.

Aleaciones con mayor contenido de silicio demandarán mayor nivel de estroncio para alcanzar un adecuado nivel de modificación.

La velocidad de enfriamiento impuesta por las condiciones del molde permanente puede reducir el contenido de Sr usual, debido a la parcial modificación térmica.

1.2) Objetivo.

Estudiar el efecto que tiene el contenido de silicio en la demanda de Sr para modificar aleaciones Al-Si coladas en molde permanente.



Capítulo II

El Aluminio

El aluminio es un material muy importante en la industria actual, ya que sus múltiples aplicaciones le brindan un alto valor en el mercado. Después de las aleaciones ferrosas, las aleaciones base aluminio son las más usadas en la actualidad, es un gran avance considerando que apenas hasta hace un siglo su producción comenzó a industrializarse. Existen múltiples propiedades y aplicaciones para las distintas aleaciones base aluminio, lo que lo hace un material versátil y el cual podemos encontrar en la mayoría de las aplicaciones con las cuales vivimos día con día.

Es un metal cuya demanda se ha acrecentado de manera exponencial en las últimas décadas a una razón de 10% anual, esto se debe a su gran versatilidad, la cual hace que el metal sea implementado en la mayor parte de la industria gracias a sus propiedades naturales como lo son: alta ductilidad, gran maleabilidad, buena conducción de corriente eléctrica, ligereza, entre otras propiedades. Al aluminio lo podemos encontrar en todas partes, desde el objeto más cotidiano como lo puede ser una lata de soda o, inclusive, poder hallarlo como componente en el tanque de un cohete especial.

El aluminio es uno de los tres elementos más abundantes en la corteza terrestre (tan solo después del Oxígeno y Silicio), en la naturaleza se encuentra en compuestos combinado con otros elementos y formando algunos minerales como lo son la bauxita, la criolita, las arcillas o los feldespatos; así como también es posible encontrarlo en las gemas tales como el rubí, el zafiro, el jade, la esmeralda, entre otros. En la **Figura 2.1** se pueden apreciar los elementos que se encuentran en mayor proporción en la corteza terrestre. [1]

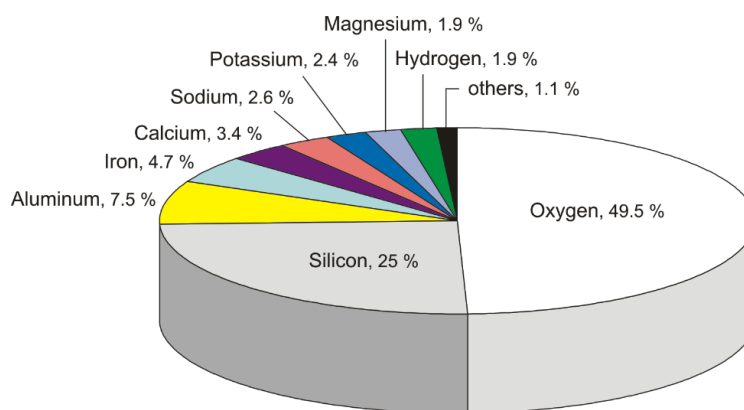


Figura 2.1. Elementos con mayor abundancia en la corteza terrestre



2.1) Producción de Aluminio [1]

La producción mundial de aluminio en la actualidad se basa en el antiguo “Método Hall-Hérault”, el cual se ha ido actualizando y perfeccionando en las últimas décadas para poder tener rendimientos mayores con purezas cercanas a los cuatro dígitos. Dado que intervienen procesos electrolíticos, la alta demanda de electricidad focaliza a las industrias a ubicarse en países donde la energía eléctrica tenga un bajo costo. El aluminio que se obtiene en la actualidad consta de un proceso de dos etapas, en la primera se fabrica el óxido de aluminio (el cual es la materia prima) mediante el “Proceso Bayer” y la segunda etapa consiste en procesar ése óxido mediante electrólisis (Proceso Hall-Hérault).

La mayor parte de la materia prima se obtiene a partir del mineral “Bauxita”, la cual posee entre un 20% y 30% de aluminio. La bauxita está constituida principalmente por Hidróxidos de Aluminio, Bohemita, Diasporita [$Al(OH)_3$, $AlOOH$ & $AlOOH$ respectivamente], además de óxidos de hierro y otros elementos.

El proceso Bayer para la obtención del óxido de aluminio a partir de la mineral bauxita, básicamente es un proceso hidrometalúrgico de separación y extracción (Con sósca cáustica), altamente eficaz y selectivo con la ley que se requiere extraer. Consiste en la extracción del Hidróxido de Aluminio a una elevada temperatura, además de una separación del residuo sólido. Una vez enfriada la suspensión, el hidróxido de aluminio cristaliza (precipita) al depender de la misma la capacidad de disolución del hidróxido de Aluminio en la sosa cáustica. El Hidróxido de Aluminio se deshidrata mediante calor, para convertirlo en óxido. Éste proceso ha sido sometido a mejoras a lo largo de los años.

Para la obtención a nivel industrial de aluminio primario (Aluminio con alta pureza) se realiza a escala global, mediante el óxido de aluminio y criolita fundida, de acuerdo al proceso “Hall-Hérault”. Dado el alto punto de fusión y baja solubilidad, se puede realizar su electrólisis en criolita fundida alrededor de los $970^{\circ}C$. A escala industrial, se utilizan ánodos de carbono consumibles colocados de manera horizontal, el producto de la reacción anódica es el compuesto “Dióxido de Carbono”. [2]

En la **Figura 2.2** se puede observar el arreglo de la cuba de electrólisis con sus respectivos componentes.

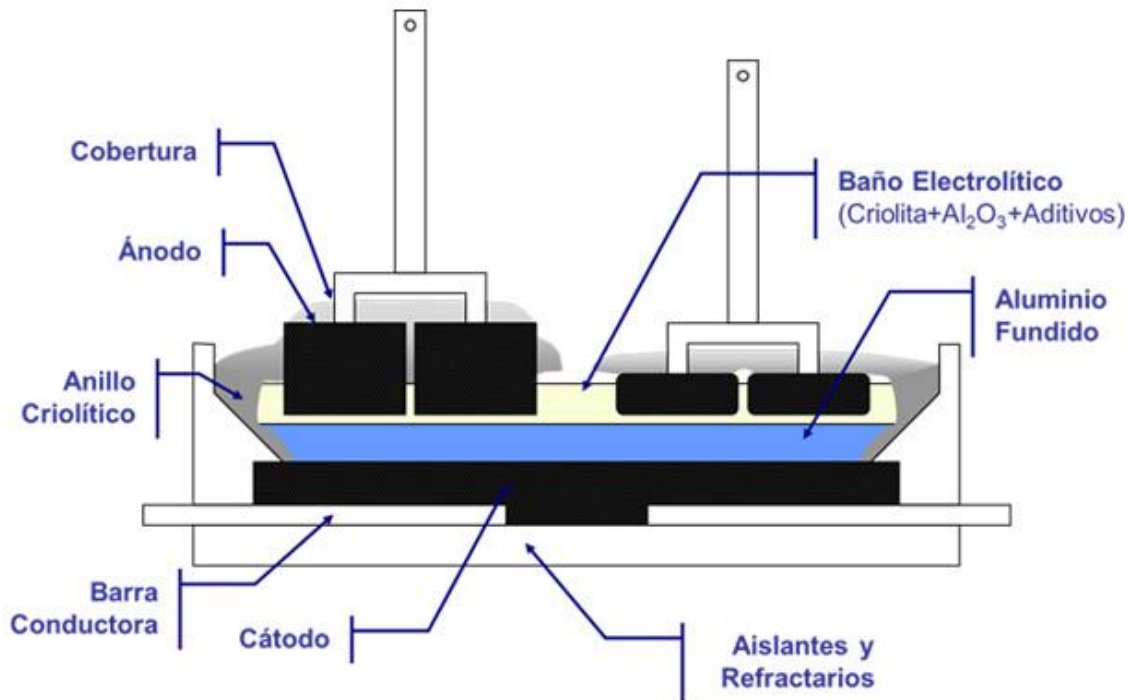


Figura 2.2 Cuba electrolítica (Corte transversal).

Las celdillas se encuentran funcionando con una intensidad de corriente constante en todo momento, básicamente se trata de una electrólisis simple en la cual, el producto de interés es el aluminio primario metálico, con una alta pureza. Las mejoras realizadas en las últimas décadas se basan en el aumento de intensidades de corriente mediante el aumento en el número de celdillas. Esto ha mejorado la producción de metal y disminuido el consumo eléctrico del proceso. Actualmente, mediante estos procesos mejorados la producción ronda las 100 mil toneladas anuales.

2.2) El aluminio secundario

Actualmente, en las zonas donde la producción de aluminio primario es poco viable (ya sea por situaciones económicas o ausencia de yacimientos de bauxita, es decir, por situación geográfica) se recurre a la producción de aluminio secundario para poder satisfacer la demanda del mercado. El aprovechamiento de chatarra de aluminio es primordial en este aspecto. En Norte América la industria del aluminio secundario es de suma importancia, ya que se utiliza la mayor parte de chatarra y desperdicios procedentes de procesos defectuosos, por lo que se reaprovecha.

La separación de distintos elementos aleantes tales como Hierro, Níquel o Cobre, cuya diferencia de puntos de fusión nos ayuda para una separación física, se



pueden separar en el proceso de fusión ya que estos elementos quedan como partículas sin fundir. Para poder separar otros elementos no metálicos se utilizan distintos fundantes o escorificantes, los cuales ayudan a generar una capa de escoria compuesta por distintos elementos no deseados en la aleación. Con estos procesos, y con la ayuda de aleaciones maestras las cuales poseen distintos elementos requeridos para la especificación deseada, se puede fabricar casi cualquier tipo de aleación.

2.3) Propiedades del aluminio

El aluminio posee excelentes propiedades conductivas (Eléctricas y Térmicas) cuando posee una alta pureza (Alrededor de 99.99%) y a temperaturas bajas, ya que los elementos afectan significativamente esta propiedad en particular. Incluso el aluminio presenta “Superconductividad” cuando se encuentra cercano a la temperatura de “Cero Absoluto”.

En cuanto a sus propiedades ópticas, el aluminio posee una reflectividad por encima del 90% para longitudes de onda desde 0.9 hasta las 12 Micras, para longitudes de onda inferiores a 0.2 micras la reflectancia del aluminio es cercana al 70%.

El punto de solidificación/fusión del aluminio es a los 660.37° C, esta temperatura es baja comparada con el acero, por lo que la fundición de aluminio no requiere el suministro de cantidades descomunales de energía.

La corrosión es, en muchas ocasiones, la principal razón por la cual los materiales ingenieriles fallan. El aluminio puro posee una mejor resistencia a la corrosión si se compara con el aluminio comercial, esto se debe a la alta reactividad del oxígeno con el aluminio, el cual, forma una película continua de óxido de aluminio en la superficie (Capa catódica), la cual previene el futuro deterioro del metal. El espesor de la capa de “Óxido de Aluminio” va de los 2 a los 20 nanómetros, la formación de esta película se ve favorecida en presencia de vapor de agua.

Las propiedades mecánicas del aluminio y sus aleaciones, dependen en gran medida del nivel de pureza del metal y de los tratamientos térmicos aplicados. El aluminio puro posee bajos valores de Resistencia a la Tensión, Resistencia a la fatiga y dureza. Cuando el aluminio es aleado con otros elementos y le es realizado el tratamiento térmico indicado, las propiedades mecánicas pueden alcanzar incluso valores similares a algunos aceros comerciales. [2] [3]

2.4) Aspectos económicos de la industria del Aluminio

El Aluminio es el elemento no ferroso más utilizado en el mundo, con un consumo anual de más de 24 millones de toneladas. “Su resistencia y ligereza lo han convertido en un insumo estratégico en la fabricación de equipo de transporte, en el sector de la construcción, así como en la elaboración de envases y empaques”



Aproximadamente el 80% del volumen total de este metal es “Aluminio Primario”, el restante se deriva de chatarra de piezas de colada. La industria del aluminio posee una aportación de aproximadamente \$174 miles de millones de dólares únicamente en la economía Estadounidense.

El aluminio por sí solo, es una parte esencial de la economía global, teniendo un papel fundamental en el aspecto económico de más de 30 países alrededor del mundo. Se estima que más de 45 millones de toneladas de productos semifabricados con aluminio son producidos anualmente, incluyendo 14 millones de toneladas provenientes del resultado del reciclaje del aluminio. La industria del aluminio genera más de un millón de empleos directos en todo el mundo, e indirectamente provee inclusive cuatro veces la cifra antes mencionada. A lo largo de la historia, Estados Unidos fue uno de los mayores productores de Aluminio a escala global, teniendo en México un gran porcentaje de este metal de origen americano, a partir del año 2000 la producción de Aluminio proveniente de Estados Unidos cayó de manera dramática, colocándose en el cuarto lugar, por detrás de China, Rusia y Canadá. [4] [5] [6] [7]

2.5) Reciclaje del Aluminio

Se estima que la producción mundial de aluminio primario, derivado de la Bauxita es mayor a 30 millones de toneladas. De las más de 750 millones de toneladas de aluminio primario producido desde el nacimiento de la industria del aluminio, se estima que aproximadamente 400 millones de toneladas de aluminio eventualmente serán aprovechadas para ser recicladas. Actualmente, el aluminio secundario se ha convertido en un elemento valioso para la producción de piezas en la industria, además es sumamente atractivo por los beneficios económicos y ambientales, los cuales, pueden mejorar la sustentabilidad de la industria del aluminio.

Se requieren 16 KWh para producir 1 Kg de aluminio primario a partir de alúmina, y se requieren 23.8 KWh por kilogramo si se parte de la Bauxita. La misma cantidad de aluminio secundario producido a partir de aluminio reciclado requiere aproximadamente un 5% de la energía utilizada si se compara con la producción de aluminio primario, es decir, se puede ahorrar hasta un 95% de energía obteniendo aluminio a partir del reciclaje. A escala global, la producción de aluminio consume un 2% de la energía eléctrica producida en todo el mundo, además de los aspectos energéticos, la producción de aluminio primario produce una alta contaminación que es emitida directamente al medio ambiente, ya sea por procesos de fundición o de electrólisis; es decir, también es posible reducir en más de un 90% las emisiones de dióxido de carbono al ambiente si se recicla el aluminio. [4]

En la **Figura 2.3** se observa el ciclo del aluminio de manera ilustrativa.

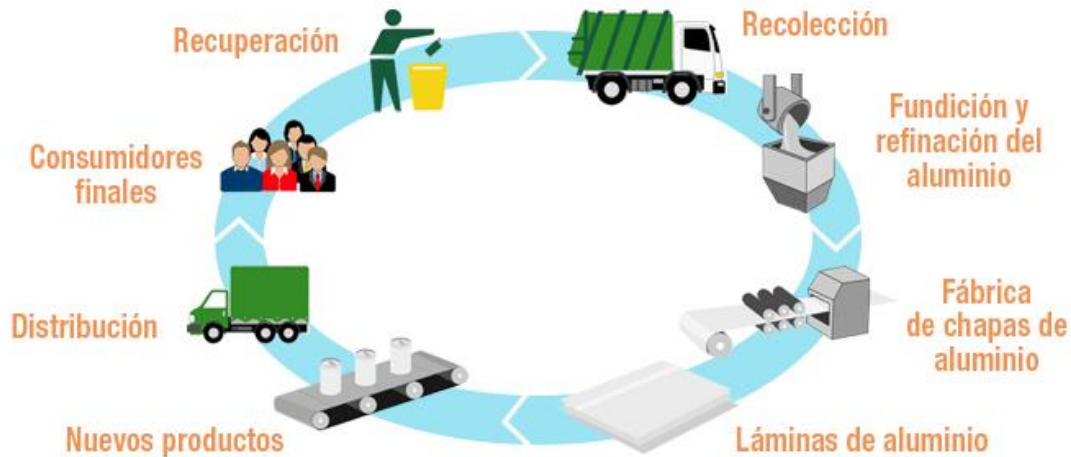


Figura 2.3 Ciclo de reciclaje del aluminio

En los Estados Unidos, uno de los países con un mayor índice de consumo de este metal, a partir del año 2002 las importaciones de aluminio secundario han incrementado sustancialmente, de tal modo que el reciclaje se ha convertido en un eje importante para la industria norteamericana. Para poder sobrevivir al mercado tan competitivo como lo es el del aluminio ha sido indispensable reducir costos energéticos y costo en la materia prima utilizada, para poder lanzar sus productos con un costo relativamente bajo; inclusive, se han encontrado datos en los cuales al sustituir tan sólo el 1% de materia prima por aluminio reciclado se pueden ahorrar hasta \$20 millones de dólares por año. [3].

El ciclo del aluminio parte desde el fin de la vida útil del producto, pasando por la recolección y procesado de chatarra de aluminio obtenida, para luego ser refundida y colada nuevamente para fabricación de piezas o lingotes y nuevamente procesada mecánicamente para usarla en un nuevo producto y en una nueva aplicación. La chatarra puede ser, hasta cierto punto, reutilizada infinitamente, sin embargo, se deben hacer los ajustes químicos correctos y limpieza del metal líquido para eliminar cualquier agente externo que contamine la aleación. [3]



Capítulo III

Procesos de Fundición de piezas de Aluminio

La fundición es un proceso tan antiguo que inclusive algunas evidencias señalan que es un proceso visto ocasionalmente en la prehistoria, en principio el proceso radica en fundir y colar el metal líquido en un molde con una forma y tamaño predeterminados para que, al solidificar, el metal obtenga la forma deseada. El proceso en sí posee muchas variables a controlar.

3.1) Aleaciones de aluminio para fundición

Dado que los procesos de formación de componente de aluminio y sus aleantes repercuten directamente en las propiedades. “The Aluminum Association of America”, define las siguientes familias para aleaciones de fundición:

- 1xx.x: Aluminio puro con diferentes niveles (AA) de pureza.
- 2xx.x: Aleaciones que poseen Cobre como mayor elemento aleante.
- 3xx.x: Aleaciones Aluminio-Silicio, que también pueden contener Magnesio o Cobre.
- 4xx.x: Aleaciones Binarias de Aluminio-Silicio
- 5xx.x: Aleaciones que poseen Magnesio como mayor elemento aleante.
- 6xx.x: Aleaciones sin uso actual
- 7xx.x: Aleaciones de Aluminio que poseen Zinc como mayor elemento aleante. También es común encontrar Cobre, Magnesio, Cromo y Manganeso en su composición.
- 8xx.x: Aleaciones de Aluminio que contienen Estaño como mayor elemento aleante.
- 9xx.x: Aleaciones de uso en tecnología e investigación (Al-Li, Al-Sc, etc.)

De esta clasificación, las aleaciones más usadas son las 3xx.x, ya que el silicio aumenta la fluidez de la aleación, lo que permite tener mejores piezas, además de poseer Cobre/Magnesio lo que brinda una mejor respuesta a tratamientos térmicos posteriores, tal como el envejecimiento. Las familias 2xx.x, 3xx.x y 7xx.x son las únicas aleaciones susceptibles a ser tratadas térmicamente, el resto no lo son. [8] [15]



3.2) Efectos de principales elementos aleantes

Los principales elementos aleantes que son adicionados al aluminio son el Silicio, Magnesio, Cobre, Níquel, Magnesio y Zinc. En ocasiones especiales se añaden cantidades pequeñas de elementos adicionales tales como Titanio, Cerio, Cobalto y Niobio. Para efectos prácticos, la adición de Cobre, Silicio y Magnesio aumentan las propiedades mecánicas de la aleación, por lo que su resistencia a la tracción se ve beneficiada al incluso duplicarse en algunas ocasiones, a costa de afectar la ductilidad innata del aluminio. Algunas aleaciones son susceptibles a ser tratadas térmicamente, mejorando inclusive más las propiedades mecánicas de éstas. Los principales efectos de los elementos de aleación son los siguientes:

- Cobre: el cobre posee una alta importancia en las aleaciones de aluminio, es similar a la importancia del carbono en las de acero. La solubilidad del Cobre en el aluminio a 548°C es de 5.7%, sin embargo, solo el 0.2% queda en solución sólida a temperatura ordinaria, el resto precipita como fase intermetálica CuAl_2 , promoviendo un gran endurecimiento a la aleación.
- Magnesio: es un elemento que impacta de manera significativamente las aleaciones de aluminio en pequeñas cantidades. En las aleaciones de aluminio con Silicio, aunque éste no se le haya añadido de manera intencional, provoca la formación de una fase intermetálica Mg_2Si , el cual desempeña un papel importante en el endurecimiento por precipitación. Al igual que el caso del cobre, la fase Mg_2Si posee una solubilidad a 580°C de 1.6%, la cual disminuye hasta un 0.5% a temperatura ambiente.
- Hierro: el hierro prácticamente no puede formar una solución sólida, por lo que únicamente se presenta en compuestos intermetálicos (Fe Al_3), se considera una impureza, teniendo un límite de entre 0.4% y 0.6% en piezas coladas mediante molde permanente y entre un rango de 0.21% y 1.24% de Hierro.
- Silicio: es el elemento de adición más importante, el cual puede encontrarse inclusive entre un 11% y 14% en peso. De acuerdo al diagrama de fases Aluminio-Silicio, el punto eutéctico se encuentra a un 12.6%, en las cuales las aleaciones hipoeutécticas se encuentran formadas por aluminio primario (αAl) y eutéctico ($\alpha + \text{Si}$), mientras que las aleaciones hipereutécticas se encuentran formadas por Silicio primario y eutéctico ($\epsilon + \text{Si}$). En las aleaciones hipoeutécticas generalmente, es necesario realizar tratamientos de “modificación”.
- Níquel: se añade en combinación con el cobre para poder mejorar las propiedades de la aleación a altas temperaturas, además ayuda a reducir el coeficiente de expansión térmica.



- Antimonio, Sodio y Estroncio: contribuyen a la modificación de la fase eutéctica, sin embargo, el más utilizado en la industria actualmente es el Estroncio ya que requiere adiciones bajas (0.01 y 0.08%), aunque adiciones mayores promueven porosidad en la piezas y formación de intermetálicos.
- El Boro, en combinación con Titanio, puede formar TiB_2 , el cual forma sitios de nucleación idóneos para promover una refinación de grano del aluminio.
- El Zinc en algunas aleaciones de aluminio brinda una mejoría en el mecanismo de envejecimiento. [9]

3.3) Aleaciones Aluminio-Silicio

La mayor parte de las aleaciones de aluminio existentes en el mundo poseen dentro de su composición química, en algunas aleaciones el Cobre (es el elemento aleante principal) en otras aleaciones es el Silicio. En cualquiera de los casos, el Cobre contribuye a aumentar las propiedades mecánicas de la aleación y el Silicio mejora la fluidez de la aleación, además de que reduce las altas contracciones por solidificación que existen.

Para aquellas fundiciones cuyo proceso es de elevada complejidad se prefieren usar aleaciones de Aluminio con altos contenido de Silicio, es el caso del Die Casting y el proceso de fundición en Molde Permanente, las cuales poseen distintos defectos dado el proceso de solidificación tan acelerado por el tipo de molde en el cual son coladas. Las aleaciones que poseen altos contenidos de Silicio (mayores a 10%) poseen muy poca expansión térmica, lo que les da ventaja en procesos cuyas condiciones proponen altas temperaturas de trabajo.

Cuando el contenido de Silicio es mayor al 12% o 13% (El mayor contenido de Silicio es del 22%) se presentan cristales de Silicio primario los cuales aportan una excelente resistencia al desgaste; las aplicaciones en la industria de estas aleaciones hipereutécticas son dentro del sector automotriz en los motores y pistones, así como en la industria aeronáutica.

Las aleaciones que contienen silicio, además de tener buenas propiedades para el proceso de fundición, tienen como singularidad su alta resistencia a la corrosión, normalmente las aleaciones de Aluminio Silicio usadas en la industria poseen contenidos entre un 5% y 13%, el rango es bastante amplio ya que se tienen tres tipos: Hipoeutécticas (Contenidos menores al 12.6%), Eutéctica (Contenido del 12.6%) e Hipereutécticas (Contenidos mayores al 12.6% de Silicio).

Las aleaciones con alto contenido de Silicio pueden mejorar sus propiedades mediante proceso de modificación del eutéctico, añadiendo contenidos de Estroncio de manera controlada. [8]



3.4) Solidificación de aleaciones de aluminio

No es común la fundición de piezas complejas de aleaciones de la serie 1xx.x ya que sus propiedades y fluidez son deficientes. La solidificación de aleaciones de aluminio posee una serie de mecanismos que pueden ser usados para controlar las propiedades finales de la pieza colada.

Uno de los mecanismos más importantes dentro de la solidificación del metal líquido es la nucleación y crecimiento de los granos. En la teoría, existen dos tipos de solidificación: la Homogénea y SoHeterogénea. La solidificación Homogénea únicamente es posible bajo condiciones controladas y presenta subenfriamientos elevados (aproximadamente $0.2T_m$), sin embargo, cualquier cavidad, pared o partícula sólida puede realizar una cristalización promoviendo una solidificación Heterogénea. Una vez que un núcleo se ha estabilizado, comenzará el crecimiento, controlado por la movilidad atómica a través de la interfase Sólido-Líquido, la masa y la transferencia de calor. La solidificación implica un movimiento más acelerado de átomos desde la fase líquida a la fase sólida; la solidificación únicamente continuará si la temperatura de la interfase es menor a la temperatura de fusión de la aleación. [9][10]

La presencia de Silicio en las aleaciones base aluminio resulta en la solidificación de una fase eutéctica, la cual se caracteriza por el crecimiento simultáneo de dos o más fases desde el metal líquido y es posible encontrarlas con dos tipos de morfologías diferentes, cuando el volumen de la fracción de cada fase es cercana entre sí o cuando el crecimiento es a lo largo de planos cristalográficos bien definidos se le denomina "Lamellar", cuando la morfología es Fibrosa es debido a que una fase está presente en un una pequeña fracción del volumen. [8] [20]

3.5) Control Microestructural

En la metalurgia existen una serie de parámetros que son usados para describir la microestructura de piezas coladas, los cuales son:

- El tamaño y forma de grano.
- Tamaño y distribución de segundas fases o inclusiones metálicas.
- El Espaciamiento Interdendrítico (SDAS, en inglés "Secondary Dendritic Arm Spacing").

Estos parámetros se ven afectados directamente por las condiciones de solidificación, distribución y morfología del eutéctico; el tamaño de grano también se ve afectado por estos factores, además de los elementos aleantes que contenga la aleación. En las **Figuras 3.1, 3.2 y 3.3** se observan distintas microestructuras resultados de distintos mecanismos de solidificación con diferentes procesos de fundición [8] [15] [20]

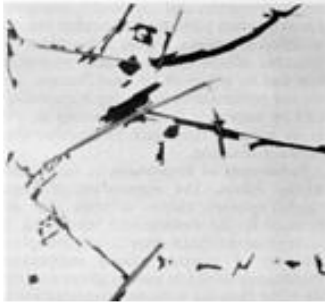


Figura 3.1. Microestructura de aleación Al-5% Si colada en molde de arena

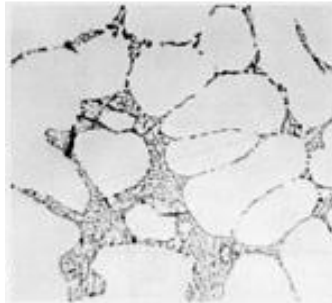


Figura 3.2. Microestructura de aleación Al-5% Si colada en molde permanente

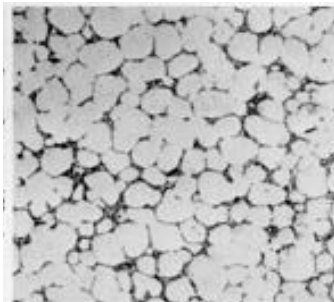


Figura 3.3. Microestructura de aleación Al-5% Si vaciada mediante colada a presión (Die casting)

La microestructura puede ser controlada eficazmente teniendo un buen control de composición química, pero puede aumentar la eficiencia si además se complementa con un buen control de temperatura y tiempo para evitar el crecimiento del grano o fases que no sean deseables, esto se puede traducir en minimizar el tiempo de enfriamiento, sin embargo, para poder controlar las fases y elementos intermetálicos mediante el control químico es difícil, es posible hacer predicciones y cálculos con bases estequiométricas y controlando la solidificación de la aleación para tener una distribución uniforme y fina de las fases y microconstituyentes. [5] [14] [20]



El uso de modificadores y refinadores de grano son un ejemplo de cómo pueden ser mejoradas las propiedades mecánicas de una aleación con base en afectaciones directas a la microestructura de las aleaciones que se deseen mejorar.

En todos los procesos de fundición durante la solidificación, el metal líquido forma dendritas, estas tienden a ser controladas por la composición y el rango de solidificación que tienen, además otros factores que afectan el espacio interdendrítico con la presencia de segundas fases, partículas de óxidos o intermetálicos y porosidad. Estas inclusiones tienden a ser atrapadas en el espacio entre los brazos dendríticos. [15]

A mayores valores del espacio interdendrítico (DAS) las aleaciones tienden a poseer propiedades mecánicas más bajas, se dice que una aleación posee una alta calidad en sus propiedades mecánicas cuando el DAS es pequeño (inferior a 45 micrómetros).

En la **Figura 3.4** se puede observar la relación entre el espacio interdendrítico con distintos rangos de enfriamiento y las propiedades mecánicas obtenidas en las piezas coladas. En la cual a mayores velocidades de enfriamiento (DAS pequeño) las propiedades mecánicas de las piezas resultantes son mayores. [5]

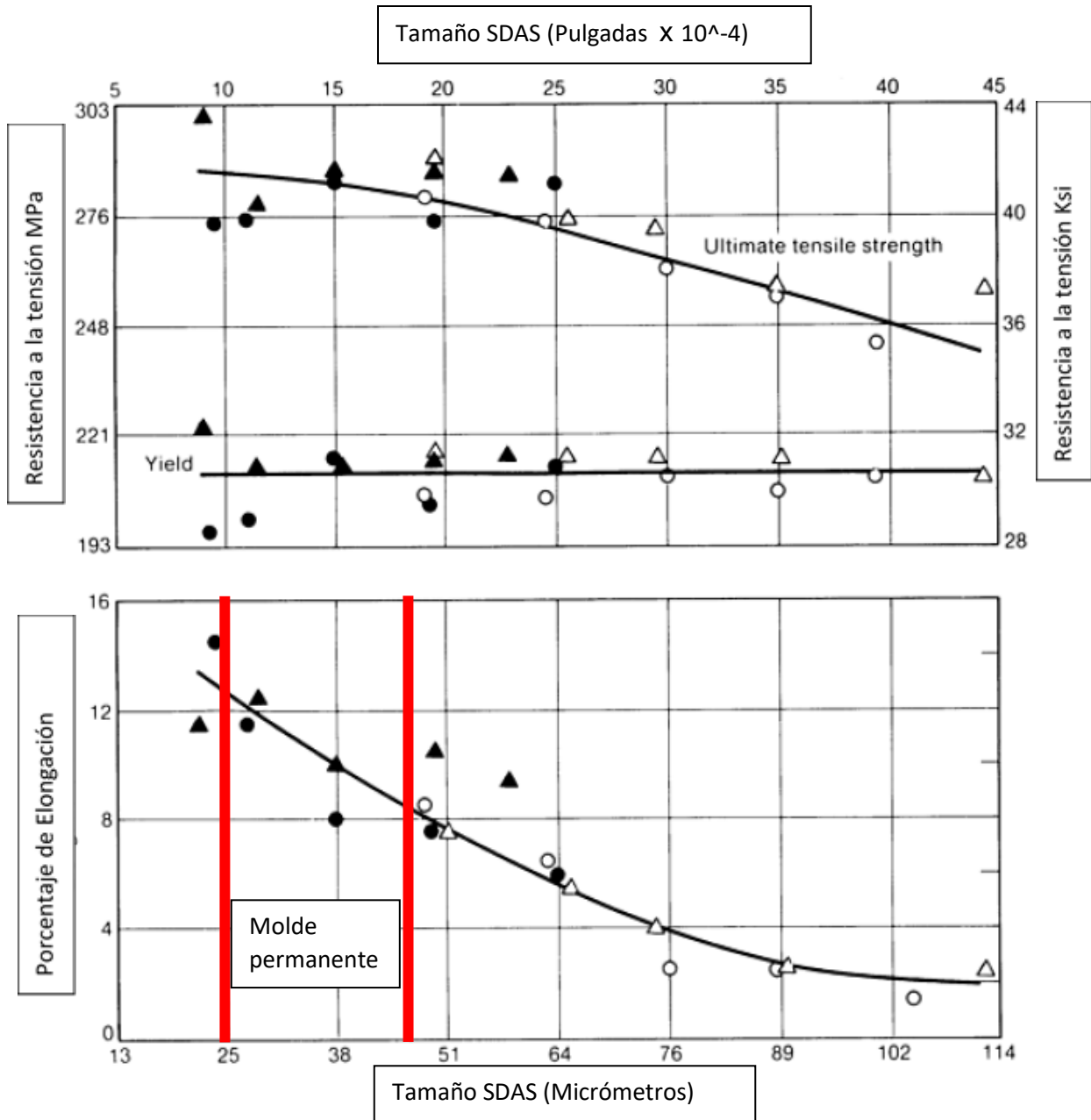


Figura 3.4. Relación entre el tamaño del DAS y las propiedades mecánicas resultantes en piezas fundidas para aleación 356. La zona denotada se refiere al molde permanente (PM).

En relación al enfoque en el SDAS, la obtención de aleaciones comerciales se origina por la formación de dendritas durante la solidificación, especialmente de las aleaciones Hipoeutéticas de Aluminio-Silicio las dendritas están formadas de Aluminio Primario (α Al). La separación o distancia entre los brazos de las dendritas son generalmente medidos en las ramificaciones secundarias, éstos valores únicamente se ven alterados por la velocidad de solidificación. [20]



En cuanto a tamaño de grano, una estructura equiaxial fina favorece a la obtención de mejores propiedades mecánicas y un mejor acabado superficial, además de que disminuye la tendencia a la segregación por lo que los tratamientos térmicos resultan ser más efectivos. Sin embargo, los inconvenientes son aumento en la porosidad y distribución homogénea de intermetálicos. La reducción de grano es promovida por un incremento en la eficiencia de la nucleación, esto puede ser posible acelerando el enfriamiento o añadiendo elementos químicos para proveer sitios de nucleación. En la mayoría de procesos de colada el metal comienza a solidificar tan pronto entra en contacto con las paredes del molde, lo que provoca un alto rango de nucleación en esta zona, por lo que una columna de granos equiaxiales se forma. Una “película” de estos granos tienden a crecer, formando una nueva película de granos columnares (Lo que provoca una disminución en las propiedades mecánicas de la aleación), este crecimiento termina cuando el gradiente de temperatura cambia y nuevos núcleos pueden formarse.[5]

En las aleaciones de alta calidad se busca obtener la mejor relación entre propiedades mecánicas altas y una buena ductilidad, es por eso que el tamaño de grano al ser fino y lo más equiaxial posible brinda los resultados que se necesitan. El tipo y tamaño de grano formado dependen directamente de la composición química de la aleación, rango de solidificación y por último de las aleaciones maestras que se le agreguen (Las cuales tienen elementos intermetálicos) y brindan una solidificación heterogénea.

El rango de solidificación es el mecanismo principal para determinar el tamaño de grano, sin embargo, la adición de elementos refinadores de grano tienen un papel fundamental en la macroestructura que se obtiene finalmente. Todas las aleaciones son susceptibles a formar macroestructuras finas y equiaxiales. La aleación maestra más utilizada para el refinamiento de grano es Al-Ti-B, el cual contiene normalmente entre 3% y 10% de Titanio y entre 0.2% y 1% de Boro. Se consideran estas aleaciones maestras “endurecedoras”, por lo que es importante al agregarlas tener controles muy precisos para poder predecir el tamaño, distribución, forma y nucleación de la microestructura. [6]

3.6) Procesos de fundición en molde permanente

El aluminio es un metal muy versátil, capaz de ser fundido por cualquier proceso de fundición estudiado actualmente; sin embargo, los procesos más utilizados en molde permanente (Molde metálico) son Die Casting (colada a presión) y proceso de fundición en molde permanente a gravedad. Para elegir el proceso adecuado de acuerdo al proyecto que se vaya a realizar, se toman en cuenta los siguientes factores importantes:

- Factibilidad y costos



- Calidad requerida
- Propiedades solicitadas

La factibilidad del proyecto depende del número de piezas a fabricar, la geometría de la pieza final, las tolerancias dimensionales que pueden ser aceptadas, las dimensiones de la pieza final y las propiedades mecánicas, entre otros. A continuación, se describirán los dos procesos de fundición en molde permanente más usados.

Colada a presión (High Pressure Casting-HPC ó Die Casting-DC): El aluminio y sus aleaciones poseen una alta versatilidad para ser fundidas mediante este método, por lo que es el metal más utilizado para fabricar piezas mediante fundición a presión. Es un proceso tan utilizado que tan sólo en Estados Unidos la fabricación de sus piezas produce ganancias de alrededor de 47.1 miles de millones de dólares anuales, además, se estima que el consumo destinado para fundición de piezas por colada a presión es casi el doble comparado con los demás procesos de fundición convencionales. Es un proceso ideal para la fabricación industrial de altos volúmenes de piezas pequeñas, estas rondan los 5 kilogramos en promedio, pero es un hecho que también pueden ser fundidas piezas de incluso 50 Kg si la pieza es costeable, ya que no es un proceso destinado para fabricar piezas muy grandes. Las aleaciones más utilizadas en este proceso son 360, 380.0, A380.0, 383, 413.0 y 518.0. [6] [12]

Las piezas obtenidas mediante Die casting poseen un excelente acabado superficial y tienden a obtener tolerancias muy cerradas (Aproximadamente de $\pm 4\text{mm/m}$) y con acabados cercanos a los 1.3 micrómetros. Los espesores de las paredes pueden llegar a ser tan delgados como del orden de 1.00 mm, además los corazones para cavidades de la pieza son metálicos, teniendo cuidado en que puedan ser removidos de manera lineal y no tener que reprocesar la pieza.

La colada a presión consiste en la inyección de metal líquido en moldes permanentes bajo una presión alta. La combinación de la rápida inyección del metal con la acelerada solidificación de la pieza (por la misma presión y por el molde metálico), resulta en una microestructura fina con altas propiedades mecánicas. Puede existir que durante el proceso exista una pequeña porción de aire atrapado o una contracción no controlada del metal durante la solidificación, lo que producirá porosidad y superficies irregulares en la pieza final, por lo que el maquinado posterior que se requiera realizar no debe superar el 1.0 mm de espesor para no dejar al descubierto las porosidades que se puedan producir.

No es común que las piezas obtenidas por este método sean tratadas térmicamente, ya que sus propiedades mecánicas por la naturaleza del proceso son excelentes.



Aproximadamente el 85% de las piezas obtenidas por colada a presión provienen de la familia de aleaciones 3xx.x, en especial de la 380.0, dado que la familia en general posee una excelente combinación de factores como el costo, las propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y buena fluidez.

Fundición en molde permanente por gravedad (Permanent Mold-PM ó Permanent-P): Al igual que la colada a presión, la fundición por molde permanente está íntimamente relacionada con una alta producción de una pieza en específico. Generalmente las piezas fundidas son más grandes si son comparadas con la colada a presión, comúnmente el máximo peso de las piezas es de 10 Kg, pero si el costo y calidad justifican la producción de piezas de mayor tamaño entonces pueden ser fabricadas.

El acabado superficial es bueno, sin embargo, el rango puede ir de las 3.8 a las 10 micras, cuya tolerancia dimensional ronda los +-10 mm/m; además de que el espesor mínimo de las paredes es de aproximadamente 3.8 mm. Los costos de maquinaria son altos, pero no tan altos como el Die Casting. Los corazones pueden ser metálicos o de arena, sin embargo, las cavidades internas tienden a ser bastante complejas.

A pesar de que las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas por fundición en molde permanente son bastante buenas, pueden ser mejoradas mediante tratamientos térmicos posteriores para alcanzar valores excelentes en tensión y dureza, generalmente el SDAS de las fundiciones coladas mediante molde permanente poseen valores entre 25 y 45 micrómetros. Los tratamientos térmicos posteriores tienden a ser a altas temperaturas, seguidas de un templado en agua, para finalmente aplicar un tratamiento de envejecimiento natural o artificial. Para aquellas piezas pequeñas con espesores muy delgados, el tratamiento a altas temperaturas y templado tienden a omitirse ya que la velocidad de solidificación tan alta que puede experimentar la pieza es suficiente para dotarla de altas propiedades mecánicas. Las aleaciones más utilizadas en fundición por molde permanente son 366.0, 355.0, C355.0, A357.0, 356.0, A356.0, B433.0 y 514.0. [4]

El proceso de fundición en molde permanente (colada por gravedad), en ocasiones, es referido como la “Colada por gravedad en molde permanente”; el molde metálico utilizado está normalmente compuesto por dos partes, el cual se abre y cierra durante su operación, los corazones son hechos de metal fácilmente removible o, cuando la complejidad aumenta, son hechos de arena (En algunos casos, el uso de corazones de arena en molde metálico se le conoce como “Fundición en molde semipermanente”).

Este proceso es utilizado para producción de grandes volúmenes de piezas coladas, con geometrías similares, espesores delgados y una forma compleja. Dado que las piezas pueden ser altamente complejas, la producción debe ser alta para poder justificar el costo de los moldes metálicos. A diferencia del moldeo en



arena, el moldeo permanente provee a las piezas finales acabados uniformes, tolerancias dimensionales más cerradas, mejores acabados superficiales y propiedades mecánicas superiores.

El proceso tiene sus limitantes, como lo son el alto costo de la maquinaria a utilizar, lo que implica valorar la producción y revisar si el proyecto realmente es costeable y generará los beneficios económicos para poder aceptar la inversión. Algunas geometrías no pueden ser coladas en molde permanente, debido a la localización de línea de partición del molde o inclusive la dificultad para extraer la pieza final solidificada del mismo. Para poder proteger la maquinaria y moldes, es necesario el uso de recubrimientos para evitar el desgaste acelerado de las superficies expuestas al aluminio líquido.

3.7) Las aleaciones eutécticas Al - Si

Las aleaciones Hipoeutécticas Al-Si poseen una amplia gama de usos dentro de la industria, gracias a su gran versatilidad y excelente relación costo-beneficio. Se caracterizan por una matriz de aluminio que llega a poseer <12% de Silicio, esto para no llegar a ser consideradas como “Aleaciones Eutécticas”. El Silicio le brinda a la aleación beneficios como aumento en la fluidez y aumento en las propiedades mecánicas de la aleación.

En la **Figura 3.5** se presenta el diagrama de fases Aluminio-Silicio, en el cual se puede observar todo el rango de aleaciones tanto hipoeutécticas, eutécticas e hipereutécticas. [6]

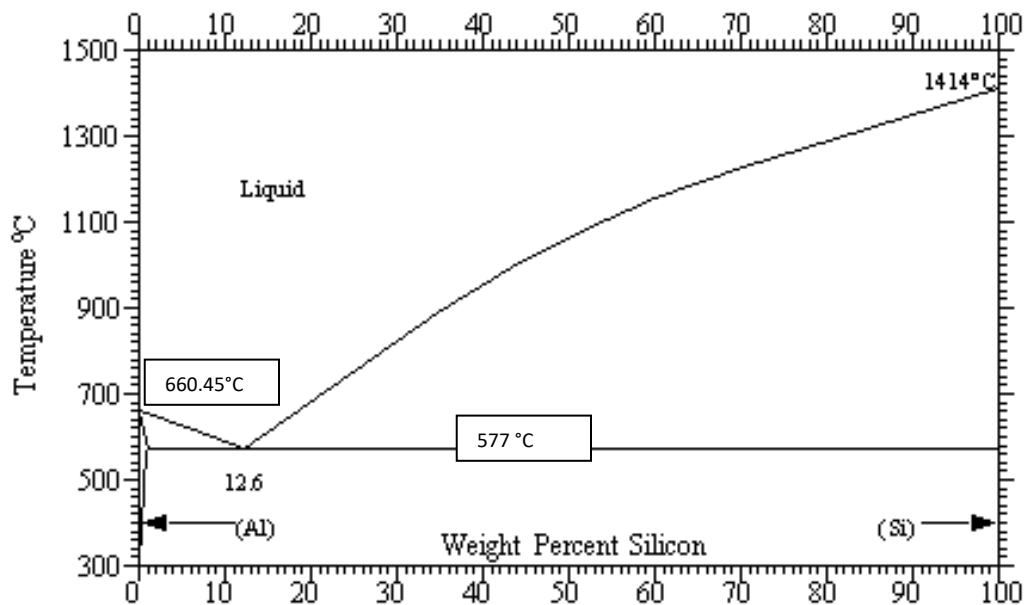


Figura 3.5. Diagrama de fases Al-Si



En la **Figura 3.6** se presentan las aleaciones hipoeutécticas Al-Si, poseen un rango bastante corto, encontrándose por debajo de 12.6% en peso de contenido de Silicio en la matriz de aluminio, sin embargo, son aleaciones cuyas propiedades mecánicas son altas y con distintos usos dentro de distintas industrias como lo son: Automotriz, aeroespacial y aeronáutica.

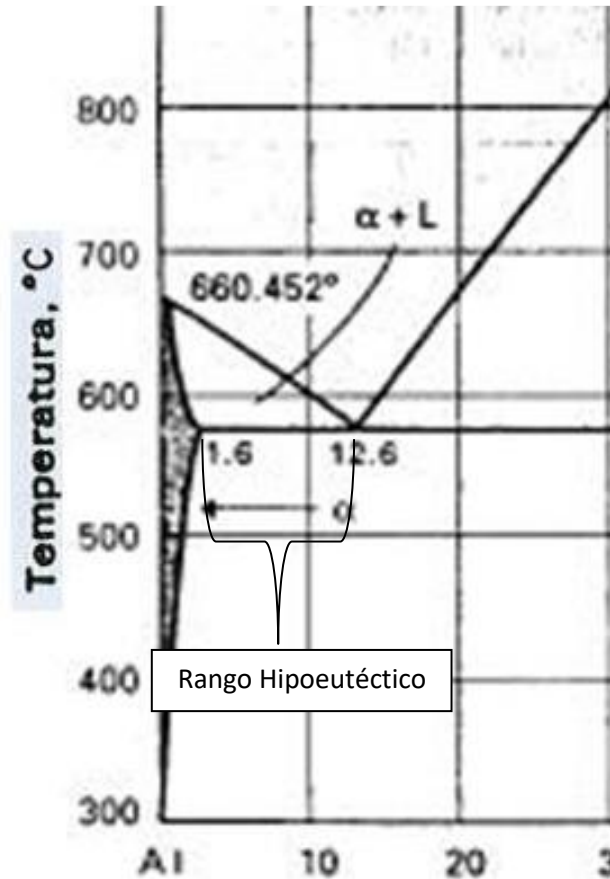


Figura 3.6. Zona de interés de aleaciones comerciales en el Diagrama de Fases Al-Si.

Las aleaciones Al-Si ven afectadas sus propiedades mecánicas por factores como el SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing), tamaño de grano, morfología eutéctica, distribución de fase eutéctica y niveles de porosidad. [11]

3.8) Mecanismo de modificación de la fase Eutéctica

Para poder mejorar las propiedades mecánicas en las aleaciones Al-Si, existen distintos métodos de tratamiento en aluminio líquido, los más utilizados son el refinamiento de grano y la modificación de la fase eutéctica del Al-Si.

En la industria existen distintos tipos de elementos modificadores, entre los más conocidos se encuentran el sodio (Na) metálico envasado al vacío y el uso de



aleaciones maestras de Al-Sr. El sodio se ha dejado de utilizar dado su impacto ambiental negativo, así como su alta generación de escoria, lo que afecta el costo y eficiencia del tratamiento de las aleaciones. En los últimos años el sodio ha sido desplazado por aleaciones maestras del tipo “Al-Sr”, ya que sus efectos son positivos y su adición es sencilla y no genera reacciones químicas que puedan afectar la calidad final de la aleación puesto que únicamente involucra su disolución en el aluminio líquido.

A pesar de que el fenómeno de la modificación de la fase eutéctica fue descubierto hace más de 90 años, el mecanismo del fenómeno aún no posee una respuesta única, ya que depende de distintos factores como lo son:

- El crecimiento de la fase eutéctica
- La nucleación de la fase eutéctica

Para explicar este fenómeno, muchos científicos brindaron sus teorías a la comunidad, algunos de ellos fueron Crossley y Mondolfo, los cuales propusieron un modelo físico basado en que en las aleaciones sin modificación, el silicio crece a una mayor velocidad comparada con el crecimiento del aluminio, resultando en partículas aciculares, añadiendo algún modificador obstaculiza el crecimiento del silicio promoviendo el crecimiento del aluminio.

En la actualidad se acepta el modelo que explica la modificación de la fase eutéctica. El modelo se basa en el “Borde re-entrante de doble plano”, o TPRE por sus siglas en inglés, el cual explica el crecimiento de la fase eutéctica en la cual señala que en el plano $[1,1,1]$ se encuentra un borde favorable para el crecimiento del cristal de Silicio a lo largo de la dirección $[1,1,2]$; la “Teoría de crecimiento restringido” nos señala que el modificador retarda el crecimiento de a fase eutéctica absorbiendo estos “TPRE” retardando así dicho crecimiento, dada la absorción de átomos del modificador (Sr por ejemplo) a través de la dirección $[1,1,1]$, por lo que el silicio debe crecer a través de distintas direcciones del plano $[1,1,2]$.

Las laminillas de Silicio cristalino en las aleaciones no modificadas crecen de manera paralela y en forma de laminillas lo que provoca concentradores de esfuerzos, disminuyendo la ductilidad y aumentando la fragilidad de las aleaciones.

En una aleación modificada el Sr distorciona la red de formación del Silicio eutéctico, generando una formación de maclas, provocando a su vez una nucleación heterogénea la cual genera tantos puntos de nucleación lo cual deriva en una red de fibras entrelazadas lo cual se observa en la microestructura. [6]

La modificación con estroncio es conocida también como “Maclación”

Básicamente a nivel microscópico, el efecto de la modificación es la transformación del silicio eutéctico en forma acicular a silicio eutéctico en forma fibrosa.

Es clara la diferencia entre una aleación sin modificación de la fase eutéctica de Silicio y otra aleación con el tratamiento de modificación realizado. En la **Figura 3.7** se puede observar con mayor claridad cómo cambia de forma acicular a fibrosa.

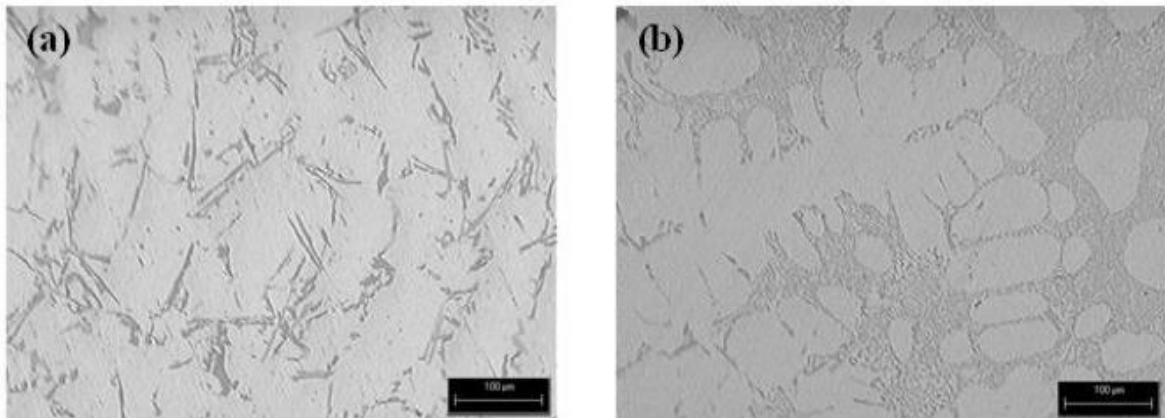


Figura 3.7. Microestructura de Aleación de aluminio 356. Se presenta el Silicio Eutéctico en forma acicular (a) y el Silicio eutéctico en forma fibrosa (b).

Los niveles típicos para la modificación exitosa de aleaciones base Al-Si utilizando el modificador de Sr, van de las 80 ppm hasta las 150 ppm de Sr, sin embargo, esto varía dependiendo de las impurezas y la homogeneidad de solidificación en las piezas tratadas mediante este método.

Existen niveles límite de modificación con el Sr, en los cuales la alta concentración de este elemento provoca una regresión, obteniéndose que el Silicio cristaliza con poca o sin modificación alguna, teniendo en la microestructura ya no fibras entrelazadas, si no placas entrelazadas, lo que disminuye sus propiedades mecánicas y su maquinabilidad.

Para poder evaluar el nivel de modificación que posee una pieza colada de aluminio se utilizan patrones como el mostrado en el **Anexo 1**, en el cual, va de un nivel nulo de modificación (1) hasta un nivel de sobre-modificación (7), en los cuales ambos extremos son indeseables en las piezas con tratamientos de modificación, por lo que un nivel (5) de buena modificación es lo idóneo.

Adicionalmente es importante la medición del SDAS ya que afecta las propiedades mecánicas. Las aleaciones que poseen estructuras finas tienen una mejor resistencia a la tensión y a la fatiga, lo cual se relaciona con valores bajos de SDAS. El valor del SDAS dentro de la industria es importante dada la relación tan íntima que posee con las propiedades mecánicas de la aleación, existen



distintos factores que afectan ésta medida, principalmente la velocidad de enfriamiento y el tipo de nucleación (Homogénea o heterogénea). Las aleaciones de Aluminio coladas en molde de arena poseen valores altos de SDAS (Por encima de los 60 micrómetros), teniendo unas propiedades mecánicas bajas. Las aleaciones coladas en molde metálico poseen valores pequeños de SDAS y se encuentran entre 20-45 micrómetros. El moldeo a presión, o Die Casting, posee un SDAS muy bajo, entre 8-15 micrómetros, ya que las piezas son sumamente delgadas y la presión con la que son inyectadas promueven un enfriamiento rápido. [6]

Específicamente en la modificación hipoeutéctica las propiedades se ven mejoradas sustancialmente cuando la aleación posee alrededor de 5% de Si. En algunas ocasiones ciertos contenidos de Fósforo suprimen el efecto de modificación, dado que el Fósforo reacciona con el Sodio y el Estroncio, anulando el efecto de modificación del Silicio eutéctico. En general el proceso de modificación mejora la resistencia a la tensión y además mejora en gran medida la ductilidad de las aleaciones, si se compara con aleaciones no modificadas; además, los metales líquidos de las aleaciones modificadas tienen mejor fluidez y poseen mejor resistencia a la fractura a altas temperaturas.

En la **Figura 3.8** se pueden observar los efectos que tiene la modificación.

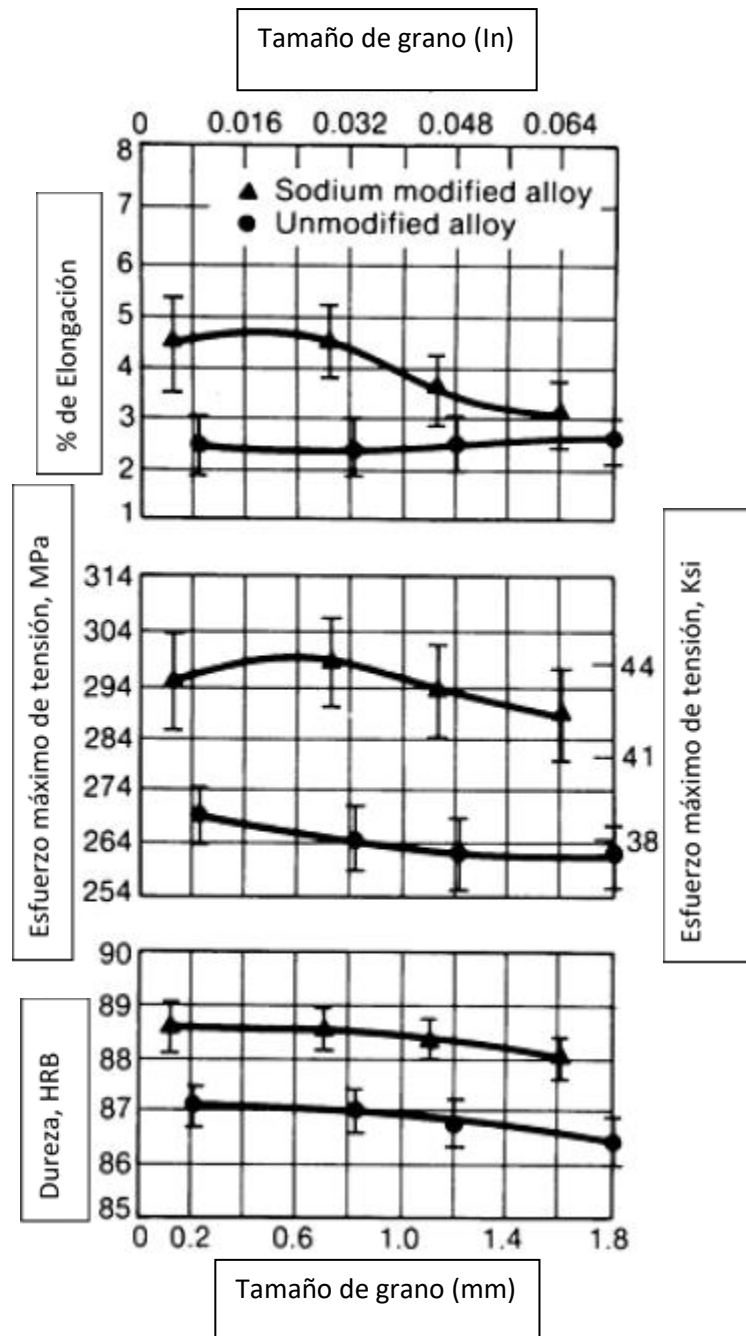


Figura 3.8. Propiedades mecánicas comparando aleación modificada y sin modificar aleación A356 (ASM Metals Handbook Vol 02)

3.9) Aleaciones de la serie 3xx.x

De la familia de la serie 3xx.x la aleación típica y más usada es la 356, la cual posee en promedio un 6% de Silicio y 0.3% de Magnesio, lo que le brinda de excelentes propiedades contra la corrosión y muy buenas propiedades para fundición, es por esto que su uso va más allá de únicamente colada en arena o molde permanente, además de que también es apta para ser utilizada en el



proceso de colada a presión. También es susceptible a ser tratada térmicamente, de este modo se mejoran sus propiedades mecánicas, lo que la hace un pilar fundamental para distintos usos dentro de la industria automotriz y aeronáutica. [6]

En las piezas que requieren alta resistencia a tensión (dado que su uso es especial) se procura que su contenido de hierro sea lo más bajo posible, aunque para usos especializados (industrias tales como aeronáutica o militar) las aleaciones que se utilizan son la 357.0, A357.0, 358.0 y 359.0 con bajísimos niveles de hierro, además de que se les aplican tratamientos térmicos controlados.

La aleación 355.0 posee una excelente respuesta a tratamientos térmicos dado el contenido de cobre que presenta, tiene buenas propiedades mecánicas, aunque su ductilidad y resistencia a la corrosión pueden ser afectadas un poco. Algunos de los productos que son fabricados con la aleación 355.0 son monoblocks para motores de inyección, camisas en los propulsores de Jets, entre otros.[7]

Capítulo IV.

Procedimiento experimental

4.1) Fabricación de aleaciones 355 y A357

Se fabricaron 6 Kg de cada una de las aleaciones 355 (5% de Silicio en promedio) & A357 (7% de Silicio en promedio) usando aluminio y silicio puros en un horno de crisol calentado por gas, la composición química se determinará por espectrometría de emisión atómica (Spectrolab).

En la **Figura 4.1** se aprecian los lingotes colados con la composición química requerida, en éste caso, de la aleación 355 que se fabricó



Figura 4.1 Lingotes colados obtenidos de la aleación 355.

4.2) Colada de blancos y aleaciones modificadas.

Se fabricaron piezas en forma de cuña, como se observa en la **Figura 4.2**, de cada aleación en molde permanente, incluyendo los blancos de referencia, así como distintos niveles de modificación teóricos que se definieron:

Aleación 355:

- 355 M0: Colado en molde permanente en forma de cuña.
- 355 M1: Nivel de modificación 1 con 0.001% Sr .
- 355 M2: Nivel de modificación 2 con 0.005% Sr
- 355 M3: Nivel de modificación 3 con 0.010% Sr

Aleación A357:

- 357 M0: Colado en molde permanente en forma de cuña.

- 357 M1: Nivel de modificación 1 con 0.009% Sr
- 357 M2: Nivel de modificación 2 con 0.010% Sr
- 357 M3: Nivel de modificación 3 con 0.020% Sr
- 357 M4: Nivel de modificación 4 con 0.030% Sr

Se utilizó un molde metálico con forma de cuña, para simular distintos espesores, de tal forma que se pueda evaluar el espaciado interdendítico (DAS), el cual es un indicativo de la velocidad de enfriamiento típica del proceso de colada por gravedad (DAS 25-45 Micrómetros).

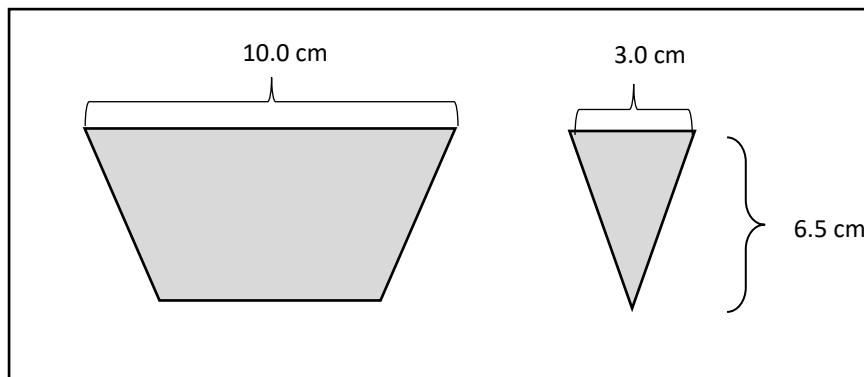


Figura 4.2 Modelo de la pieza colada en forma de cuña lateral (Izquierda) y frontal (derecha)

Se utilizó como modificador la aleación maestra: Al- 10%Sr . La presentación son varillas de aproximadamente 20 cm, donada por la compañía MARCO METALES DE MÉXICO.

En la **Figura 4.3** se observa el horno en el cual se fundió el aluminio con distintos niveles de modificación. Sobre el horno se encuentra el molde utilizado para obtener las cuñas de aluminio con distintos niveles de Sr.



Figura 4.3. Horno utilizado para fundir los pequeños lingotes de aleación 355 y 359

Dado que el Al-10%Sr está en presentación de varilla de 1 metro, éste se procedió a cortar de acuerdo a los distintos niveles de Sr requeridos, de tal modo que el porcentaje en peso fuera el correcto. En la **Figura 4.4** se observa la báscula electrónica utilizada para pesar la varilla de aleación maestra.

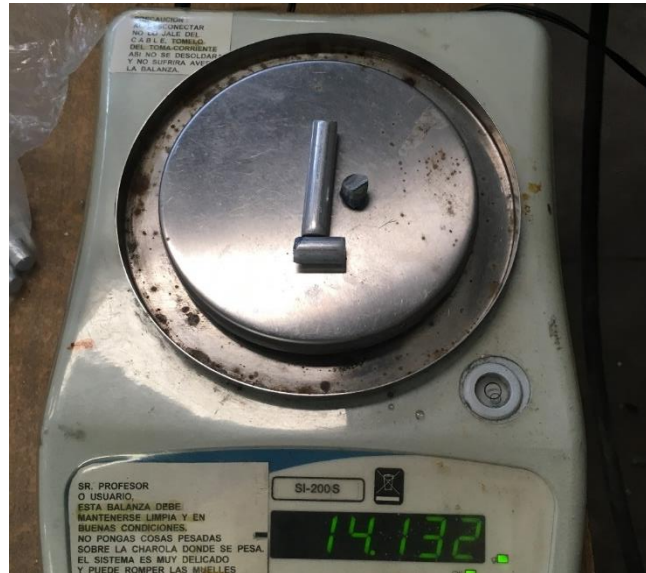


Figura 4.4. Varilla de aleación maestra Al-10%Sr.

A continuación se muestra un ejemplo de cómo se calcularon los gramos necesarios de aleación maestra con base en el porcentaje en peso que se le agregaría de Sr a cada aleación el cálculo es como el siguiente:

Ejemplo masa de modificador para la aleación A357 nivel de modificación M4 (0.020%), considerando una eficiencia del 90%.

Peso (g) de aleación 355 a fundir: 324.5 g

$$324.5 \text{ g} \left(\frac{0.020}{100} \right) = 0.0458 \text{ g de Sr para obtener el nivel M4} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$0.0458 \text{ g Sr} \left(\frac{100 \text{ g de aleación AlSr}}{10.1 \text{ g de Sr en la aleación maestra}} \right) \left(\frac{100}{90} \right) = \dots\dots\dots (2)$$

0.5038 gramos de aleación maestra AlSr 10%

Para poder mejorar el rendimiento en la adición de Sr en el aluminio líquido (al 90%), se envolvió la aleación maestra AlSr 10% en papel aluminio al adicionarlo en el horno.

Para poder incorporar correctamente el Sr en el aluminio líquido dentro del horno, se agitó con ayuda de unas varillas de hierro cubiertas con una pintura de grafito.

4.3) Preparación metalográfica

Para el análisis metalográfico de las piezas experimentales se realizó el procedimiento siguiente:

- i. Cortar transversalmente las cuñas.
- ii. Emparejar la superficie con lijas 80 y 100.
- iii. Desbastar el área con el siguiente orden de lijas: 150, 240, 360, 400, 600 y 1000.
- iv. Pulir a espejo, utilizando un paño y alúmina de 0.3 micrómetros.
- v. Atacar la superficie pulida con ácido fluorhídrico 0.5% volumen.
- vi. Tomar fotografías en tres distintas zonas partiendo de la punta de la cuña, ubicando un SDAS entre 25 y 45 micrómetros.

En la **Figura 4.5** se observa el área representativa cortada para preparar la metalografía y observar la microestructura, en particular la magnitud del SDAS.

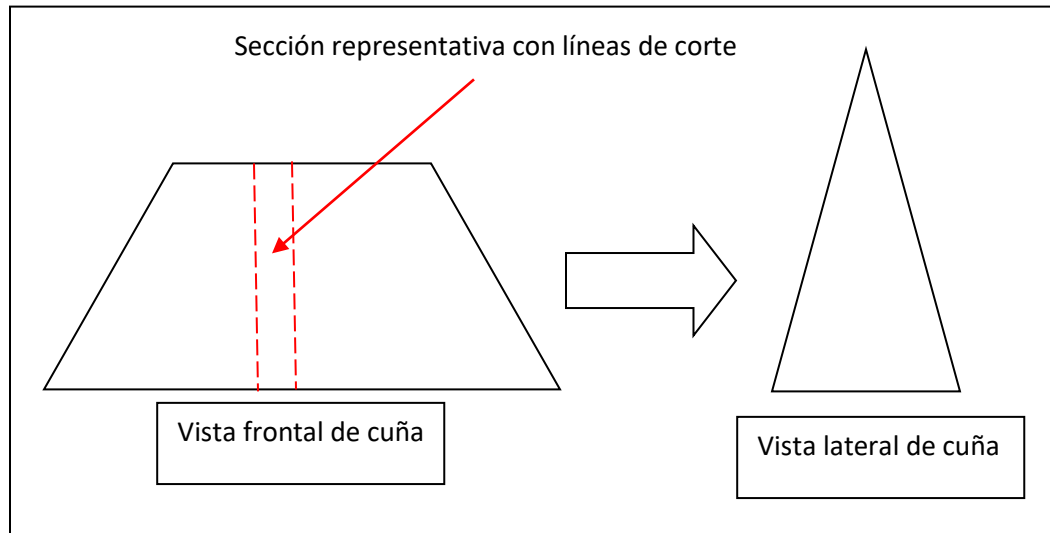


Figura 4.5. Vistas de la cuña y sección de corte

En la **Figura 4.6** se observa una muestra representativa de la cuña, similar a las muestras obtenidas en las otras cuñas.

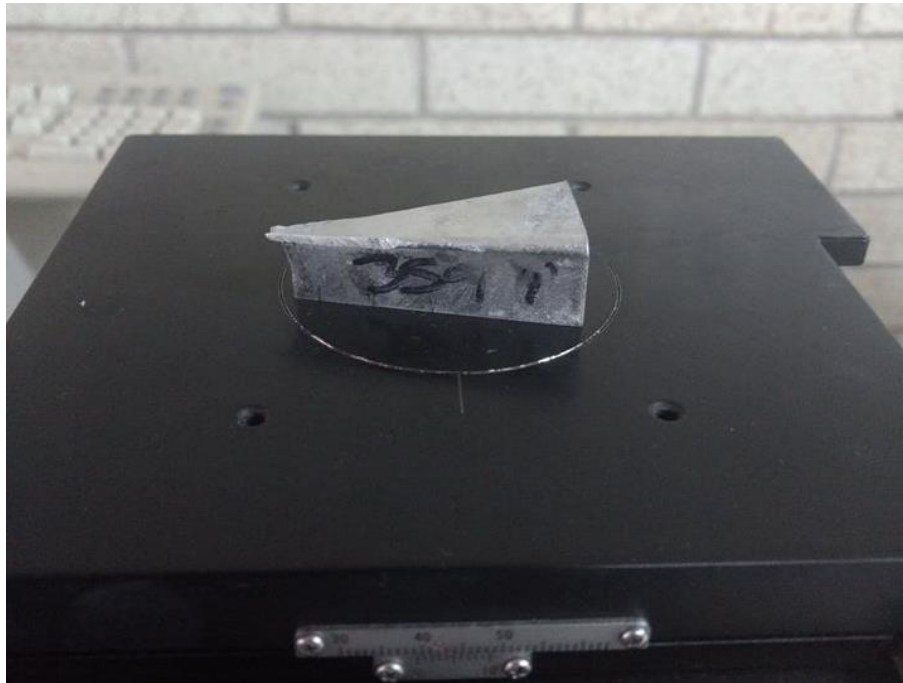


Figura 4.6. Sección de cuña para evaluar el SDAS.

En la **Figura 4.7** se observan las zonas definidas en el experimento para tomar fotografías en el microscopio, teniendo distintos valores del SDAS en cada una de ellas. La primer zona se hizo a 0.5 cm de la punta de la cuña, cada división se realizó con una distancia de 1.5 cm entre un punto y otro.

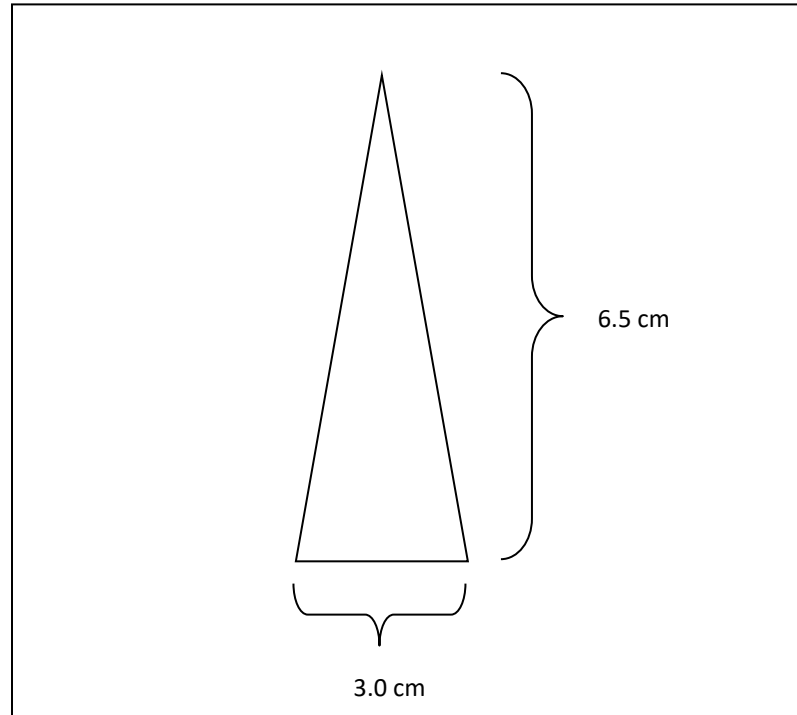


Figura 4.7. Dimensiones de la cuña

En la **Figura 4.8** se observan las dimensiones de las zonas de estudio de la cuña.

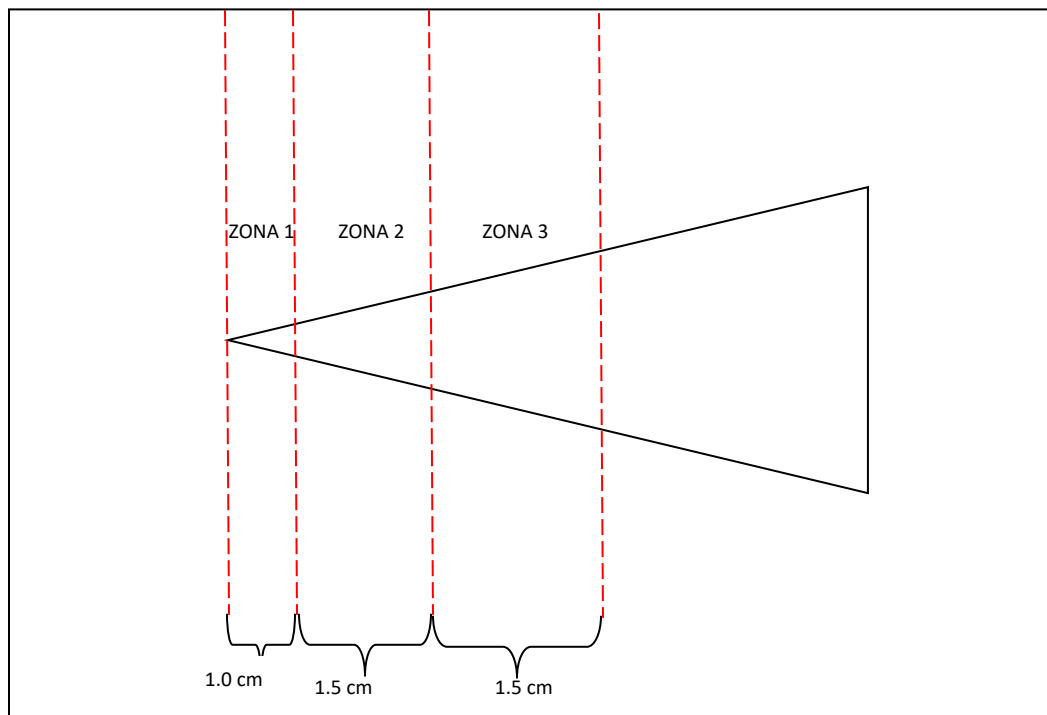


Figura 4.8. Zonas de la cuña para evaluar el SDAS

Capítulo V

Presentación y discusión de resultados

5.1) Presentación de resultados

Se utilizó la reglilla (Tomando como referencia una línea roja de 100 micrómetros) para poder medir el SDAS. Se identificaron las zonas en la cual el SDAS se encuentra en un rango entre 25 y 45 micrómetros, el cual es el intervalo para piezas coladas en molde permanente (Zona 2 y Zona 3), ya que un intervalo inferior a 25 micrómetros refiere a una pieza colada por presión; en la tabla 5.1 se presentan los resultados del SDAS de los blancos colados en lingote y en la **Figura 5.1** se observan las zonas de estudio.

Tabla 5.1. Representación de resultados SDAS Blancos colados (Lingotes)

Muestra	Blanco 355	Blanco A357
SDAS (Micrómetros)	41.11	40

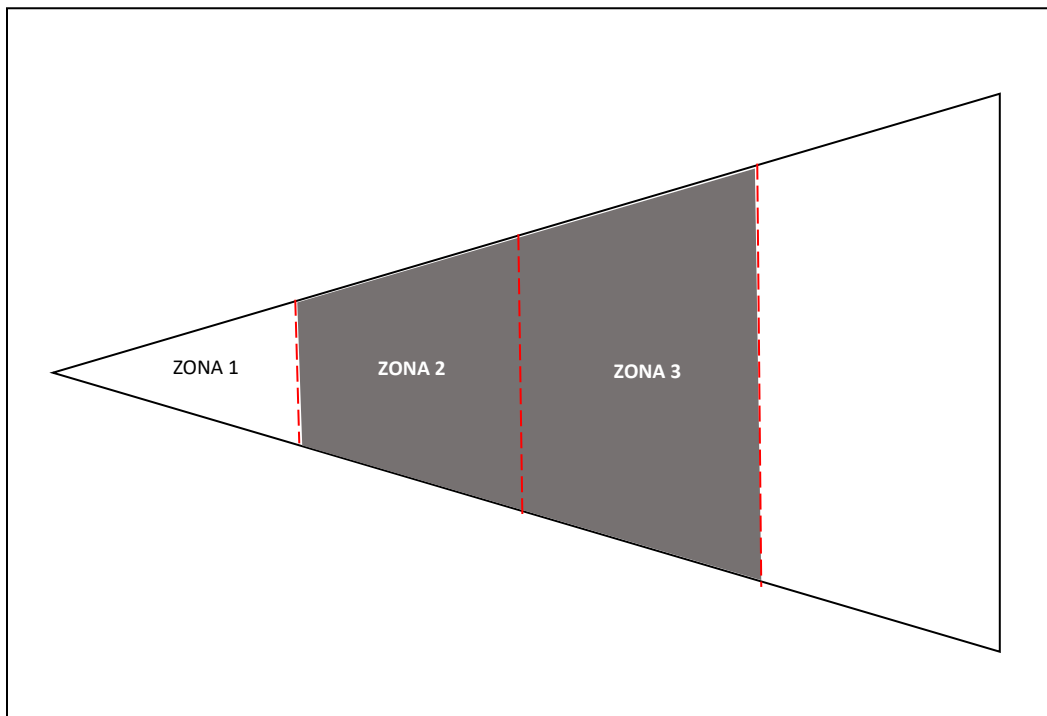


Figura 5.1. Zonas identificadas con un comportamiento de solidificación similar al molde permanente sombreadas.



El porcentaje de Estroncio residual y las composiciones químicas de cada aleación se determinó por espectrometría de emisión atómica, los resultados se presentan en la tabla 5.2 y 5.3

Tabla 5.2. Resultados de análisis químico Aleación 355

Muestra	%Si	%Fe	%Sr	%Cu	%Ti	%Mn
355 M0	4.94	0.14	0.0002	0.010	0.050	0.010
355 M1	5.33	0.14	0.0012	0.012	0.054	0.011
355 M2	4.99	0.14	0.0056	0.010	0.050	0.010
355 M3	4.91	0.14	0.0113	0.10	0.052	0.010

Tabla 5.3. Resultados de análisis químico Aleación A357

Muestra	%Si	%Fe	%Sr	%Cu	%Ti	%Mn
357 M0	6.70	0.12	0.0002	0.004	0.050	0.0050
357 M1	6.56	0.12	0.009	0.004	0.056	0.0060
357 M2	6.62	0.12	0.013	0.0036	0.054	0.0058
357 M3	6.51	0.12	0.022	0.0036	0.055	0.0059
357 M4	6.58	0.12	0.031	0.0035	0.054	0.0059

En el **Anexo II** se observa la referencia con la literatura, para corroborar que las aleaciones son 355 sin cobre y A357 [4].

Después de realizar la preparación metalográfica, se tomaron fotografías a 650 aumentos.

En las **Figuras 5.4** a la **5.12** se presentan las microestructuras obtenidas de la aleación 355.

Para poder hacer la medición del SDAS se colocaron tres líneas rojas con una medida de 200 micras marcadas en rojo de cada fotografía de las dos zonas de interés (zona 2 y 3) para poder hacer un conteo preciso del SDAS, de manera totalmente aleatoria.



Reglilla de referencia

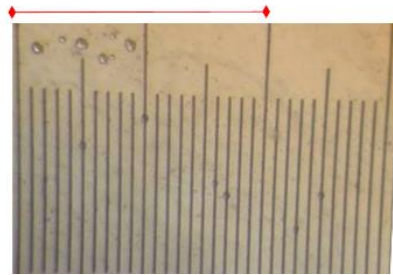


Figura 5.3. Reglilla de referencia (línea roja 200 micrómetros) tomada a 650 aumentos.

En la figura 5.4 obtenida del lingote colado en molde permanente de aleación 355 se observa una estructura sin modificar.

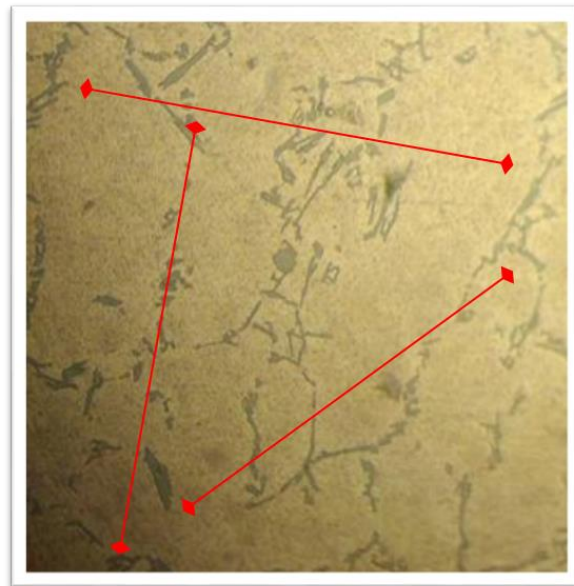


Figura 5.4 Blanco lingote Al 355 a 650x

En la **Figura 5.5** se muestra la zona 2 de la aleación 355 colada en la cuña

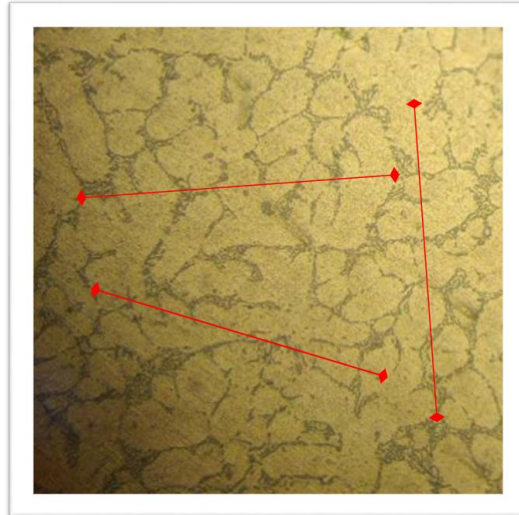


Figura 5.5 Al 355 M0 (Sin Sr) cuña Zona 2 a 650x

En la **Figura 5.6** se observa la zona 3 de la cuña sin Sr.

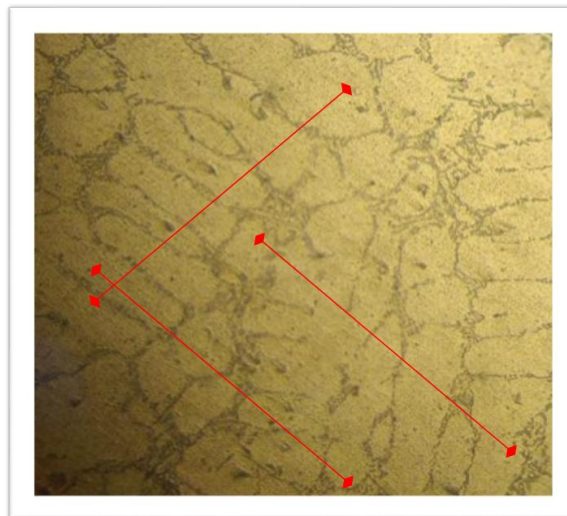


Figura 5.6 Al 355 M0 (Sin Sr) cuña Zona 3 a 650x

En la **Figura 5.7** se muestra la zona 2 de la aleación 355 con el primer nivel de modificación.

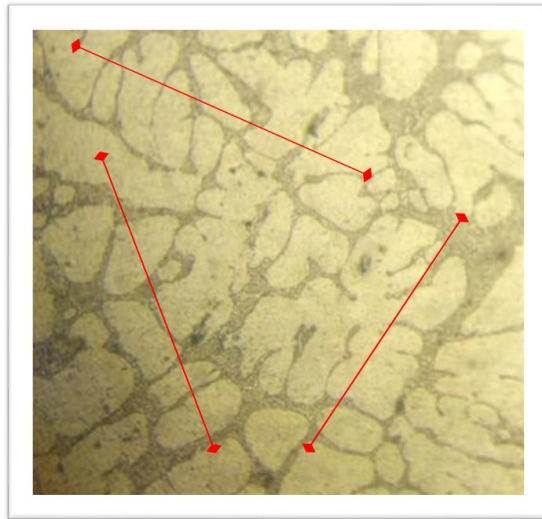


Figura 5.7. Al 355 M1 (0.0012% Sr) Cuña Zona 2 650x

En la **Figura 5.8** se observa la zona 3 de la aleación 355 con el primer nivel de modificación.

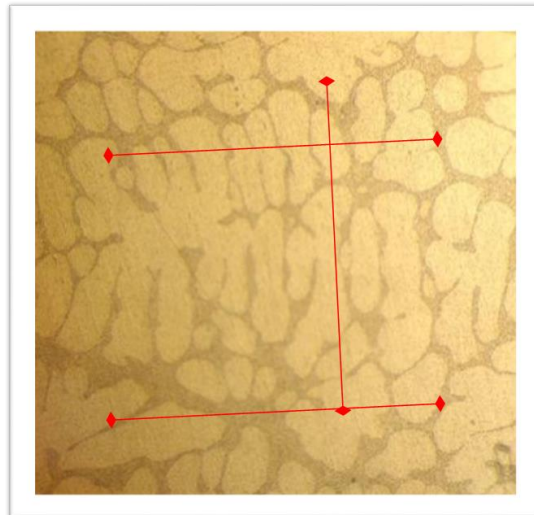


Figura 5.8 Al 355 M1 (0.0012% Sr) cuña Zona 3 a 650x

En la **Figura 5.9** se observa la aleación 355 colada en la cuña, con el segundo nivel de modificación.

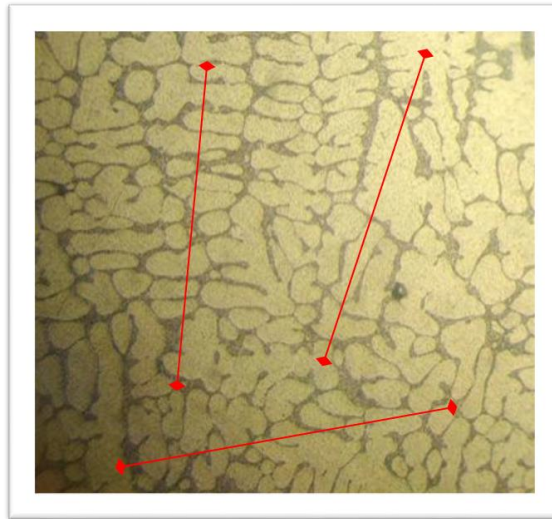


Figura 5.9 Al 355 M2 (0.0056% Sr) Cuña Zona 2 a 650x

En la **Figura 5.10** se observa la aleación 355 con el segundo nivel de modificación, colada en la cuña en molde permanente.

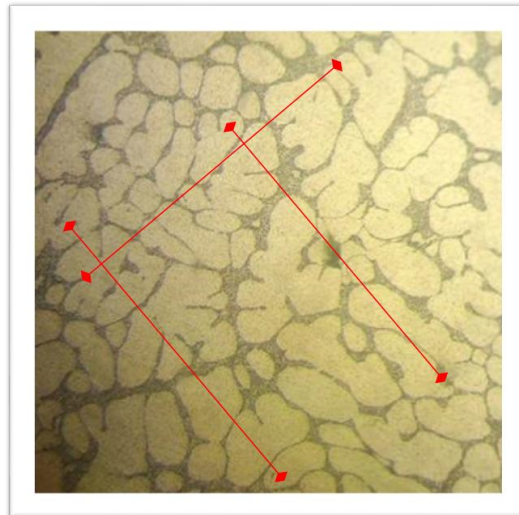


Figura 5.10 Al 355 M2 (0.0056% Sr) Cuña Zona 3 a 650x



En la **Figura 5.11** se observa la zona 2 de la aleación 355 con el tercer nivel de modificación.

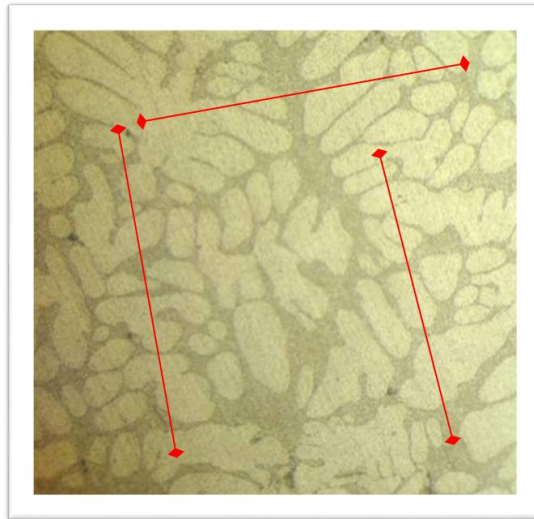


Figura 5.11 Al 355 M3 (0.0113% Sr) Cuña Zona 2 a 650x

En la **Figura 5.12** se observa la aleación 355 con el tercer nivel de modificación colada en la cuña.

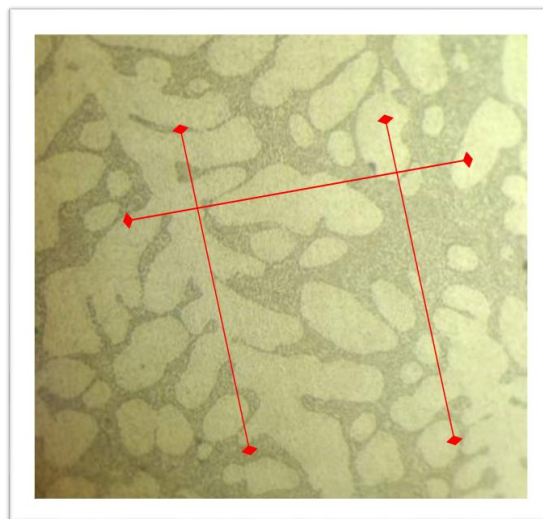


Figura 5.12 Al 355 M3 (0.0113% Sr) Zona 3 a 650x

En las **Figuras 5.13** a la **5.23** se presentan las microestructuras obtenidas de la aleación A357, tratada con distintos niveles de Sr.

En la **Figura 5.13** se observa el blanco colado en molde permanente de la aleación A357, sin modificador agregado.



Figura 5.13 Al A357 Lingote Blanco sin Sr a 650x



En la **Figura 5.14** se observa la aleación A357 sin modificador, colado en la cuña.

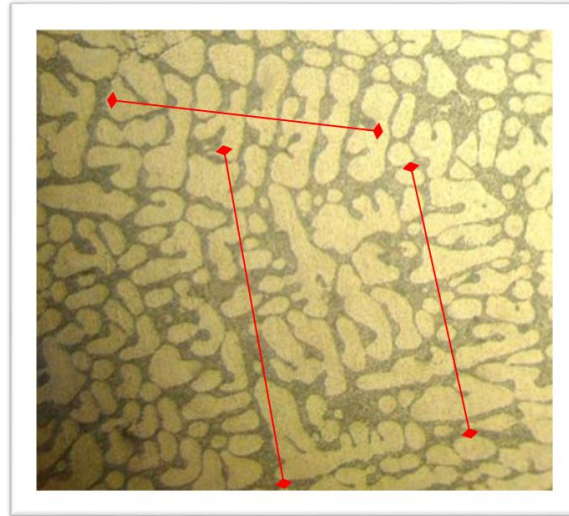


Figura 5.14 Al 357 M0 (Sin Sr) Cuña Zona 2 a 650x

En la **Figura 5.15** se muestra la aleación A357 sin modificador, colado en la cuña.

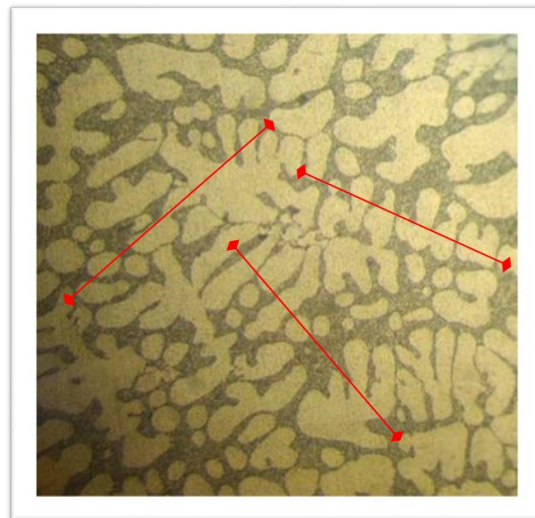


Figura 5.15 Al 357 M0 (Sin Sr) Cuña Zona 3 a 650x

En la **Figura 5.16** se observa la zona 2 del primer nivel de modificación de la aleación A357, colada en cuña.

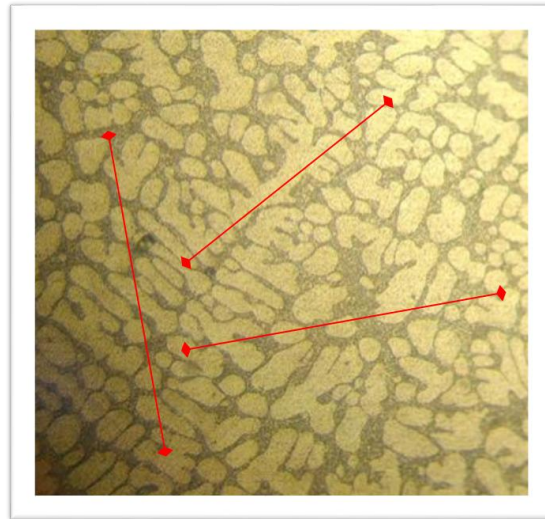


Figura 5.16 Al 357 M1 (0.009% Sr) cuña Zona 2 a 650x

En la **Figura 5.17** se observa la aleación A357 con el primer nivel de modificación en la zona 3.

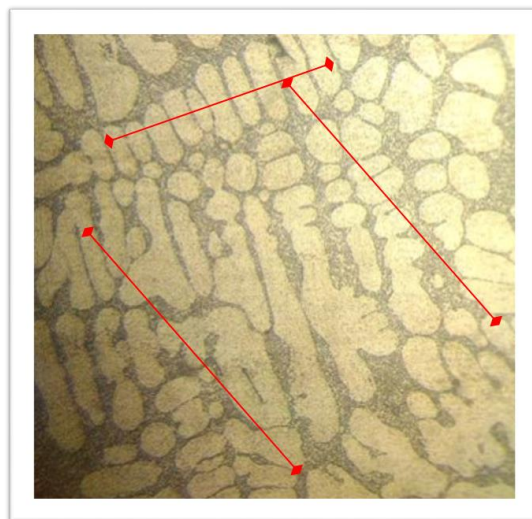


Figura 5.17 Al 357 M1 (0.009% Sr) Cuña Zona 3 a 650x



En la Figura 5.18 se muestra la aleación A367 con el segundo nivel de modificación, en la zona 2.

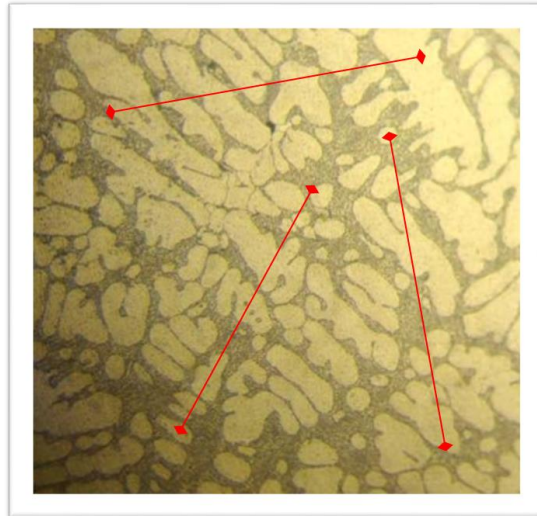


Figura 5.18 Al 357 M2 (0.013% Sr) cuña Zona 2 a 650x

En la Figura 5.19 se observa la aleación A357 con el segundo nivel de modificación, localizado en la zona 3.

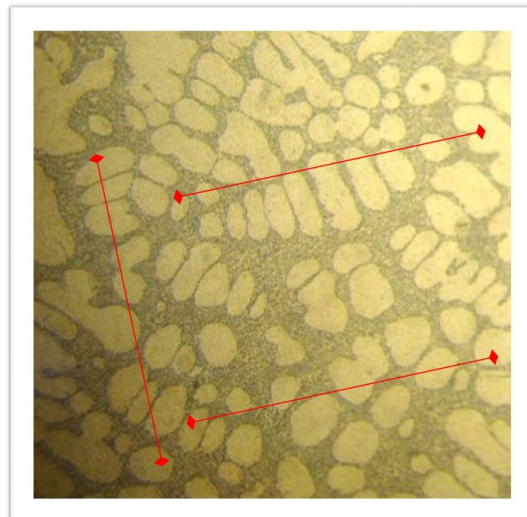


Figura 5.19 Al 357 M2 (0.013% Sr) cuña Zona 3 a 650x

En la **Figura 5.20** se muestra la aleación A357 con el tercer nivel de modificación en la zona 2.

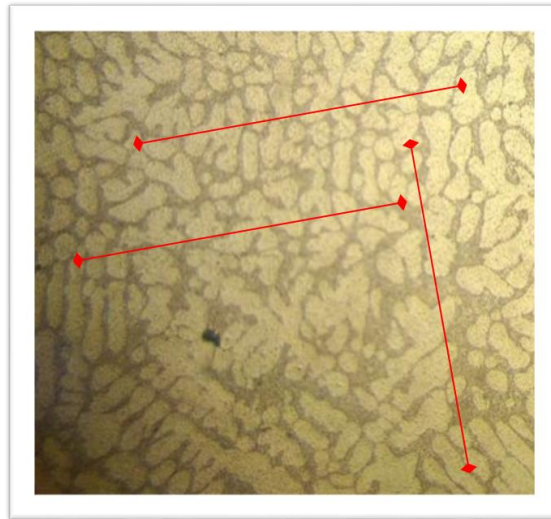


Figura 5.20 Al 357 M3 (0.022% Sr) Cuña Zona 2 a 650x

En la **Figura 5.21** se muestra la aleación A357 con el tercer nivel de modificación, localizando la zona 3.

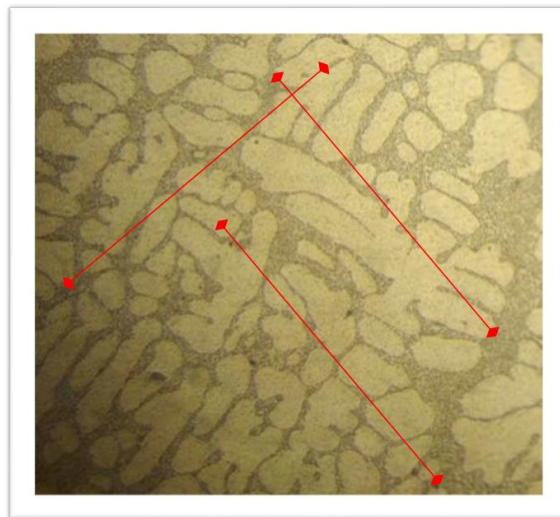


Figura 5.21 Al 357 M3 (0.022% Sr) cuña Zona 3 a 650x

En la **Figura 5.22** se observa la aleación A357 con el cuarto nivel de modificación, ubicado en la Zona 2.

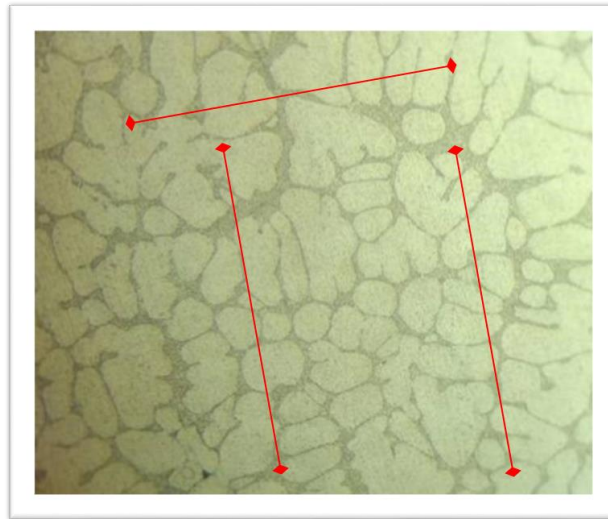


Figura 5.22 Al 357 M4 (0.031% Sr) cuña Zona 2 a 650x

En la **Figura 5.23** se observa el último nivel de modificación, de la aleación A357 colado en cuña, localizando la zona 3.

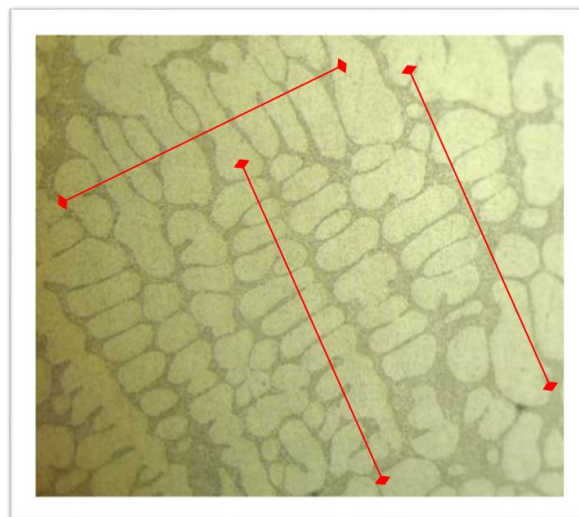


Figura 5.23 Al 357 M4 (0.031% Sr) Zona 3 a 650x



Para realizar una comparación cuantitativa, se midió el SDAS (Espaciamiento Interdendrítico) de cada aleación, la metodología para cada uno de los niveles de modificación fue:

- Estandarización de una medida constante para todas las microestructuras, de una longitud de 200 micras para las fotografías tomadas a 650 aumentos.
- Se realizaron tres mediciones en cada microestructura, con ayuda de tres líneas rojas transversales entre sí para cada fotografía de microestructura.
- Con las 3 mediciones obtenidas para cada aleación (a 650 aumentos) se realizó el siguiente cálculo:

$$Media = \frac{\text{Medición 1 a 65x} + \text{Medición 2 a 65x} + \text{Medición 3 a 65x}}{3}$$

Los resultados obtenidos (medianas) se observan en la Tabla 5.3 y Tabla 5.4

Tabla 5.3. Medias del SDAS de la aleación 355 en cuñas a distintos niveles de modificación en zona 3 y zona 2

Muestra	355 M0 Sin estroncio	355 M1 0.0012% Sr	355 M2 0.056% Sr	355 M3 0.0113 %Sr
SDAS Zona 3 (Micrómetros)	35.55	33.33	31.74	28.57
SDAS Zona 2 (Micrómetros)	30.15	28.57	27.38	23.14

Tabla 5.4. Medias del SDAS de la aleación A357 en cuñas a distintos niveles de modificación en zona 3 y zona 2

Muestra	357 M0 Sin estroncio	357 M1 0.009% Sr	357 M2 0.013% Sr	357 M3 0.022% Sr	357 M4 0.031% Sr
SDAS Zona 3 (Micrómetros)	34.07	30.16	27.38	25	22.22
SDAS Zona 2 (Micrómetros)	28.57	26.19	24.07	23.15	20

En los resultados se puede observar una disminución en el valor promedio del SDAS que responde al aumento de % de Sr residual, es decir, aumento de nivel de modificación de la aleación.

En el **Anexo III** se observan las mediciones realizadas.

5.2) Discusión de resultados

De acuerdo a la teoría, la zona de interés y el campo de estudio se definió únicamente para piezas coladas en molde permanente (SDAS comprendido entre 25 y 40 micrómetros), por lo que se enfatizó el análisis en las zonas 2 y 3 de la cuña, las cuales eran zonas cuyo comportamiento fue similar a la colada en molde permanente. De la **Figura 5.24** a la **Figura 5.34** se realizó una comparativa de la morfología de la fase eutéctica realizando un acercamiento y señalando gráficamente a que zona pertenece cada imagen (Obtenidas de las micrografías a 650 aumentos).

En la **Figura 5.24** se observa una ligera modificación de la estructura eutéctica, debido a que es promovida térmicamente debido al molde permanente, en la zona 2 se encuentra más fina dado que la solidificación es más rápida por la geometría de la pieza, lo cual se repite en todas las coladas en cuña.

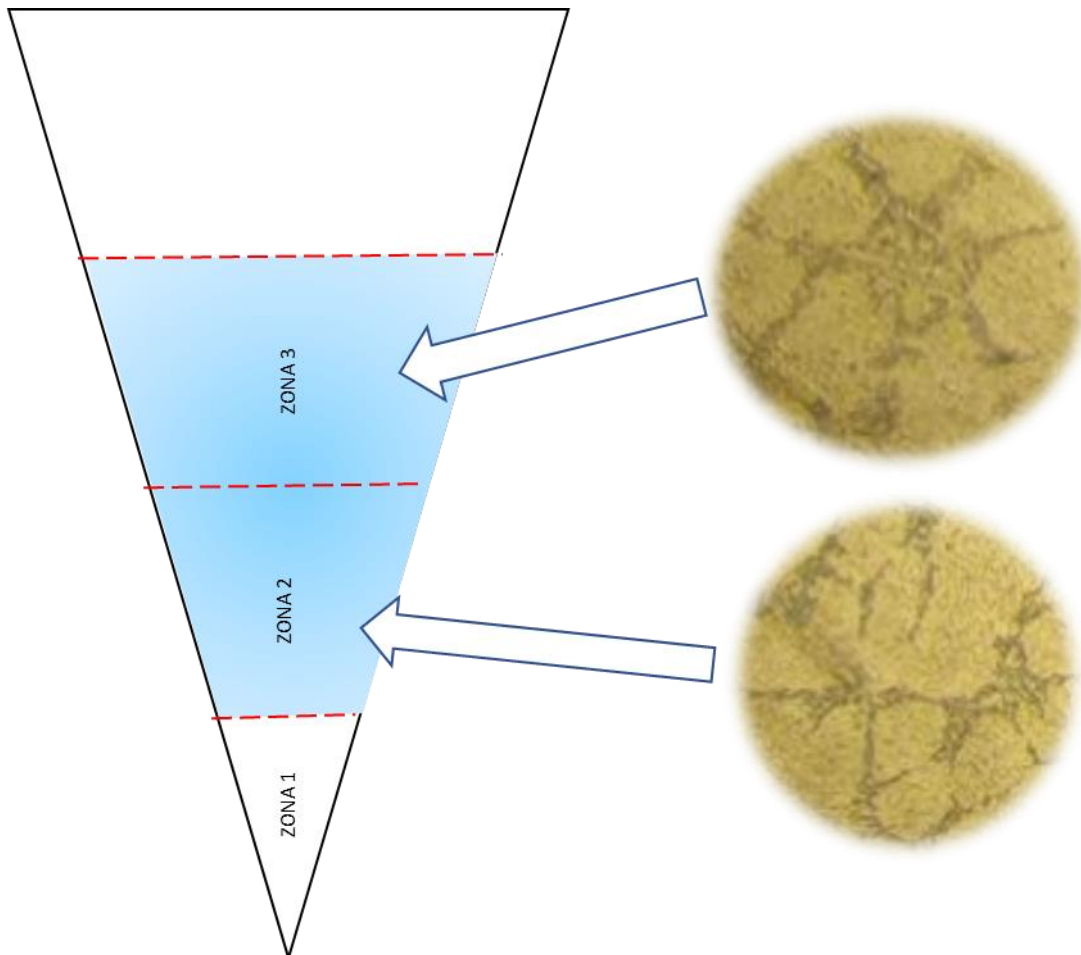


Figura 5.24 Microestructura de fase eutéctica 355 M0 (Sin estroncio) Blanco

En la **Figura 5.25** se muestran las microestructuras de aleación 355 con 0.0012% de Sr residual, lo que brinda una ligera modificación debido al Sr, sumado a la modificación térmica dada por el molde permanente.

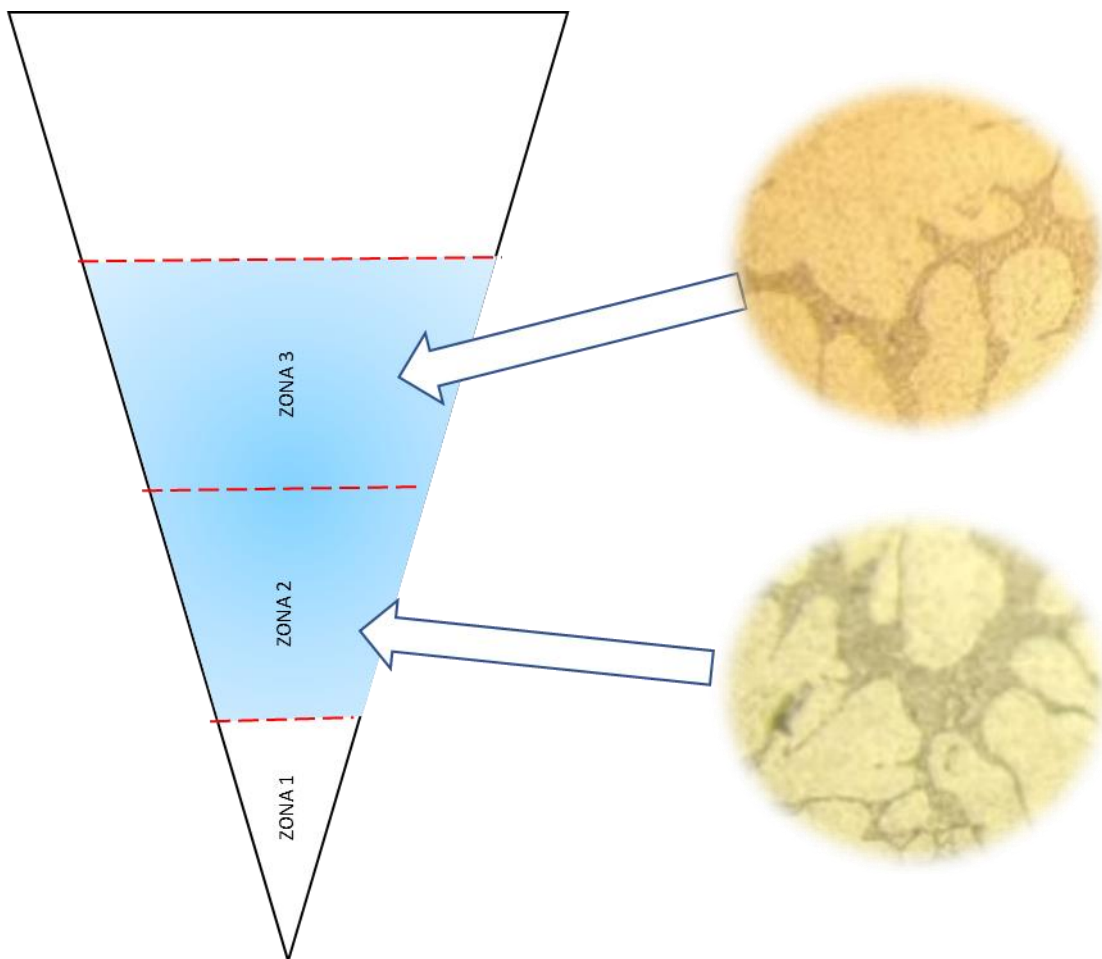


Figura 5.25 Microestructura de fase eutéctica 355 M1 (0.0012% Sr)

En la **Figura 5.26** se muestra la aleación 355 con 0.0056% de Sr residual, el aumento en la modificación es evidente, sin embargo, se encuentra en un nivel de modificación suficiente, sin llegar a ser buena.

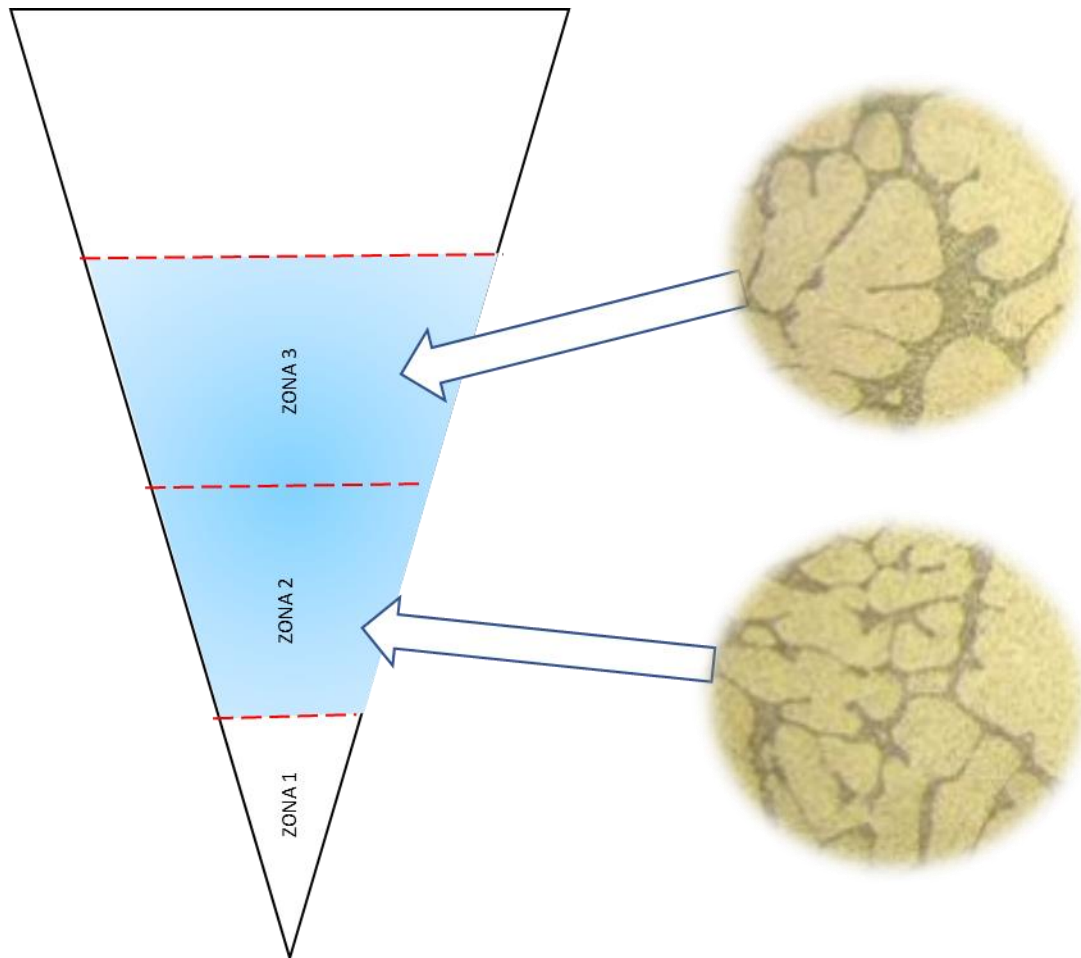


Figura 5.26 Microestructura de fase eutética 355 M2 (0.0056% Sr)

En la **Figura 5.27** se observa la aleación 355 con 0.0113% se Sr residual, en éste caso fue suficiente el porcentaje de Estroncio agregado sumado a la modificación térmica dado el molde permanente, llegando a un nivel 5 de modificación, el cual es el óptimo.

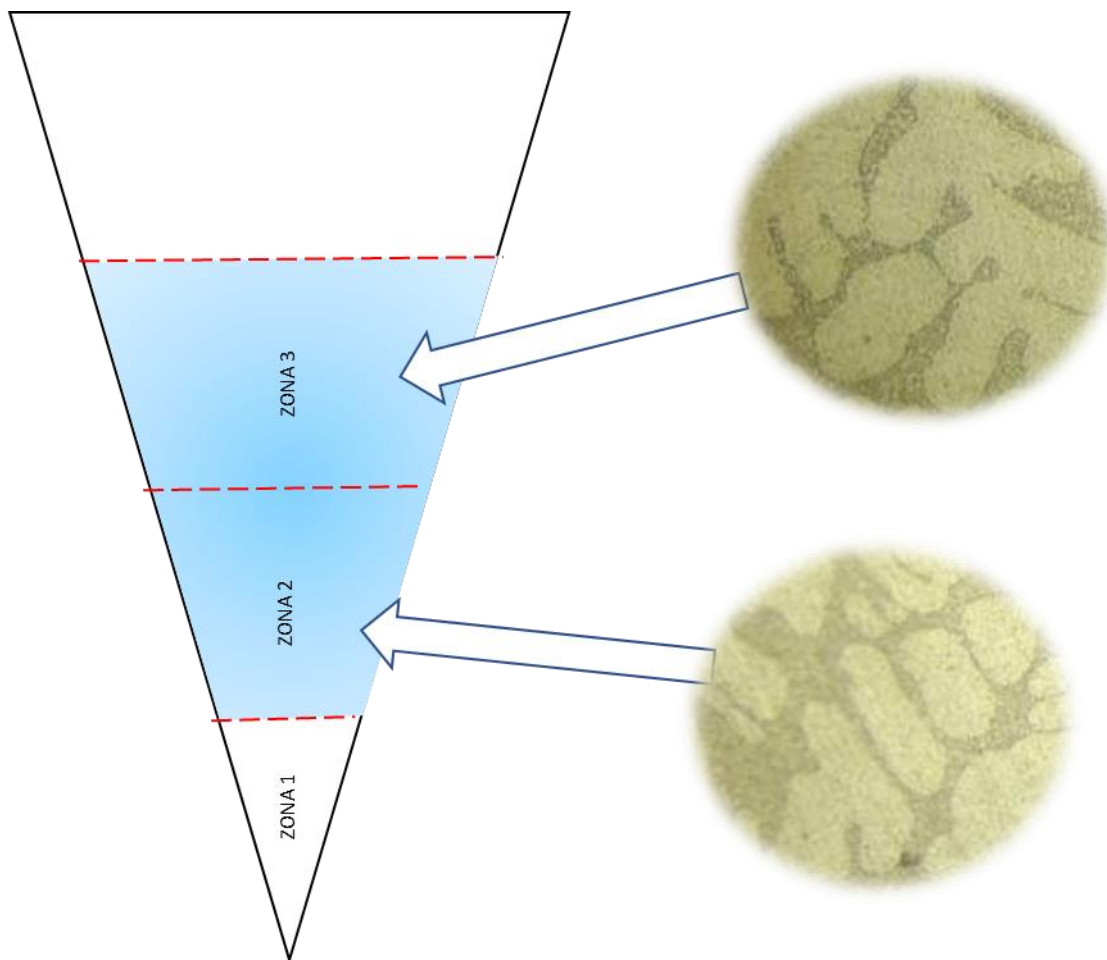


Figura 5.27 Microestructura de fase eutética 355 M3 (0.0113% Sr)

En la **Figura 5.28** se observa la aleación A357 sin Sr residual, sin embargo, la modificación es mala y está dada únicamente por el molde permanente, resultado de la modificación térmica.

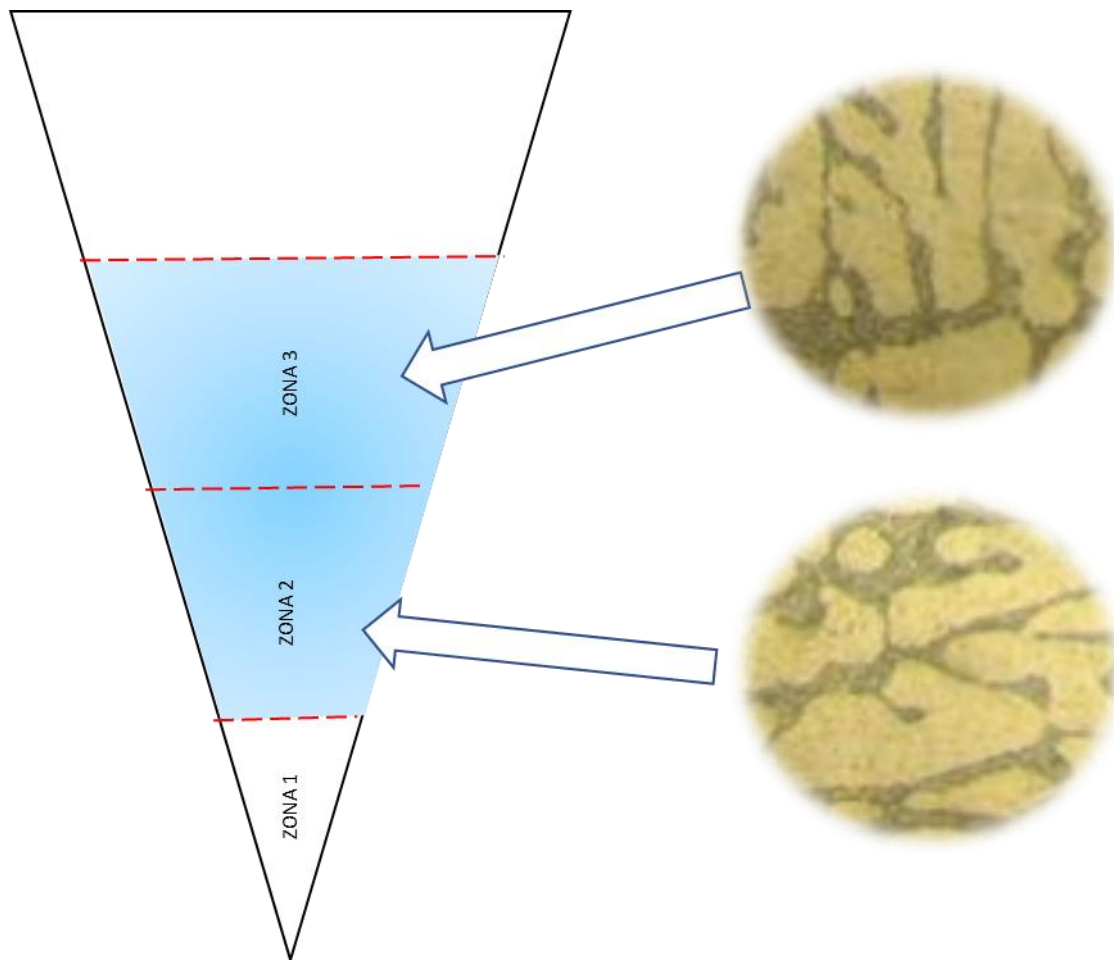


Figura 5.28 Microestructura de fase eutéctica A357 M0 (Sin estroncio) Blanco

En la **Figura 5.29** se observa la aleación A357 con 0.009% de Sr residual, lo que provoca una modificación suficiente pero no la óptima.

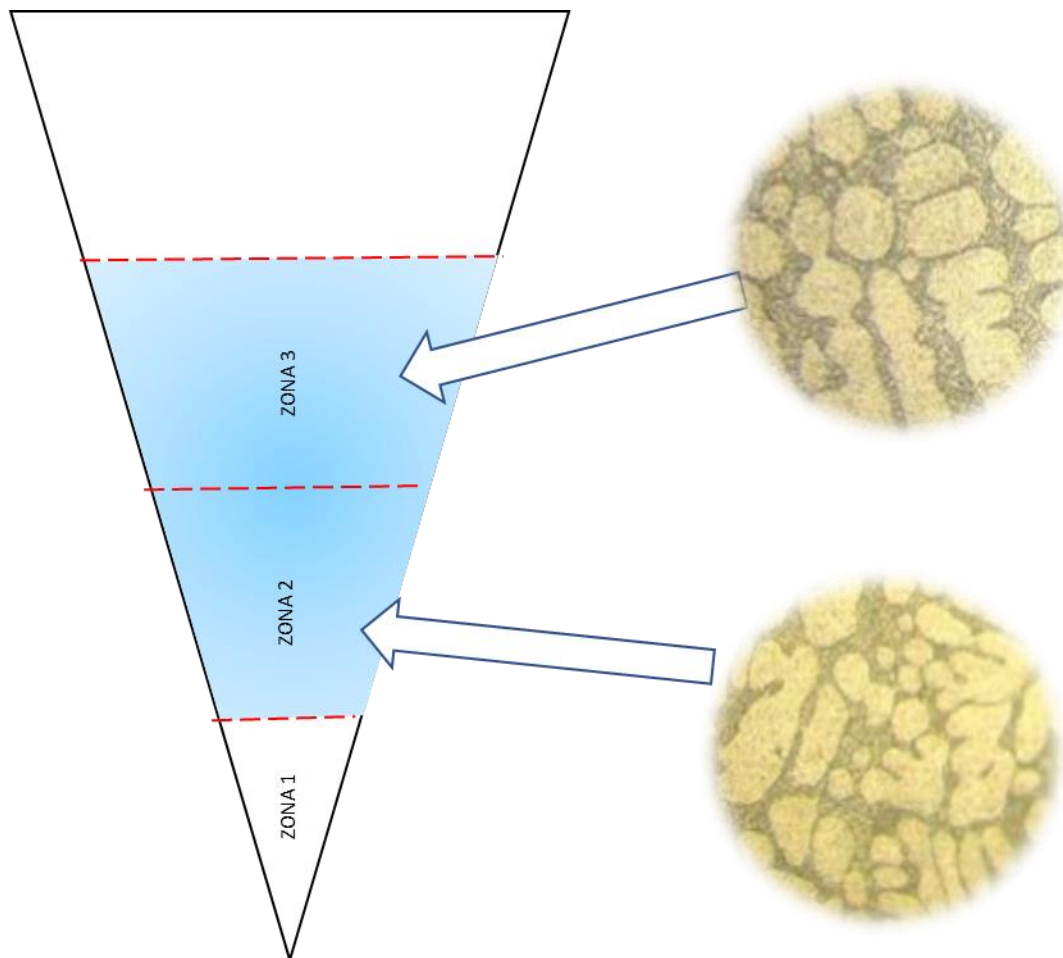


Figura 5.29 Microestructura de fase eutéctica A357 M1 (0.009% Sr)

En la **Figura 5.30** la aleación A357 posee 0.013% de Sr, lo que le brinda una modificación buena en conjunto con el efecto de modificación térmica dado el molde permanente.

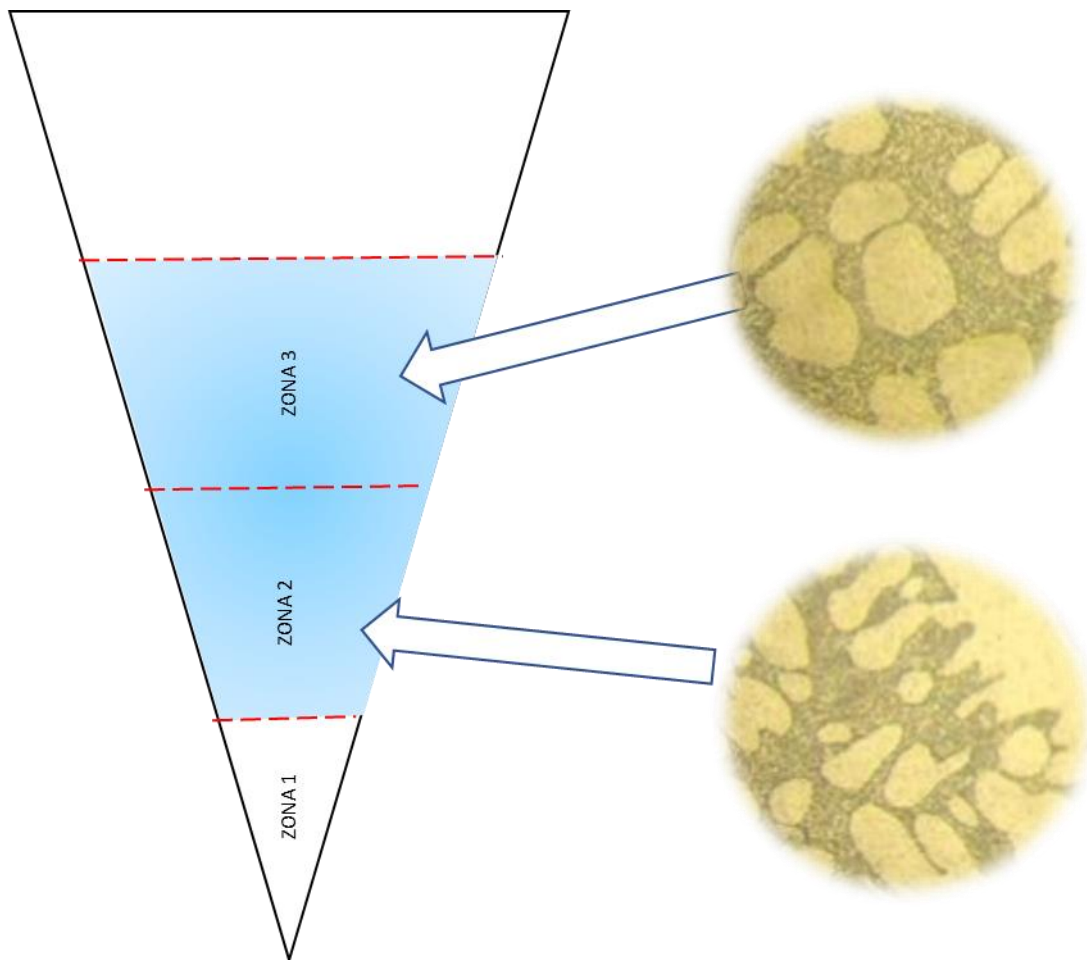


Figura 5.30 Microestructura de fase eutética A357 M2 (0.013% Sr)

En la **Figura 5.31** se observa que la aleación A357 con 0.022% de Sr residual obtiene un nivel de modificación bueno (5), sin llegar a sobremodificarse la estructura.

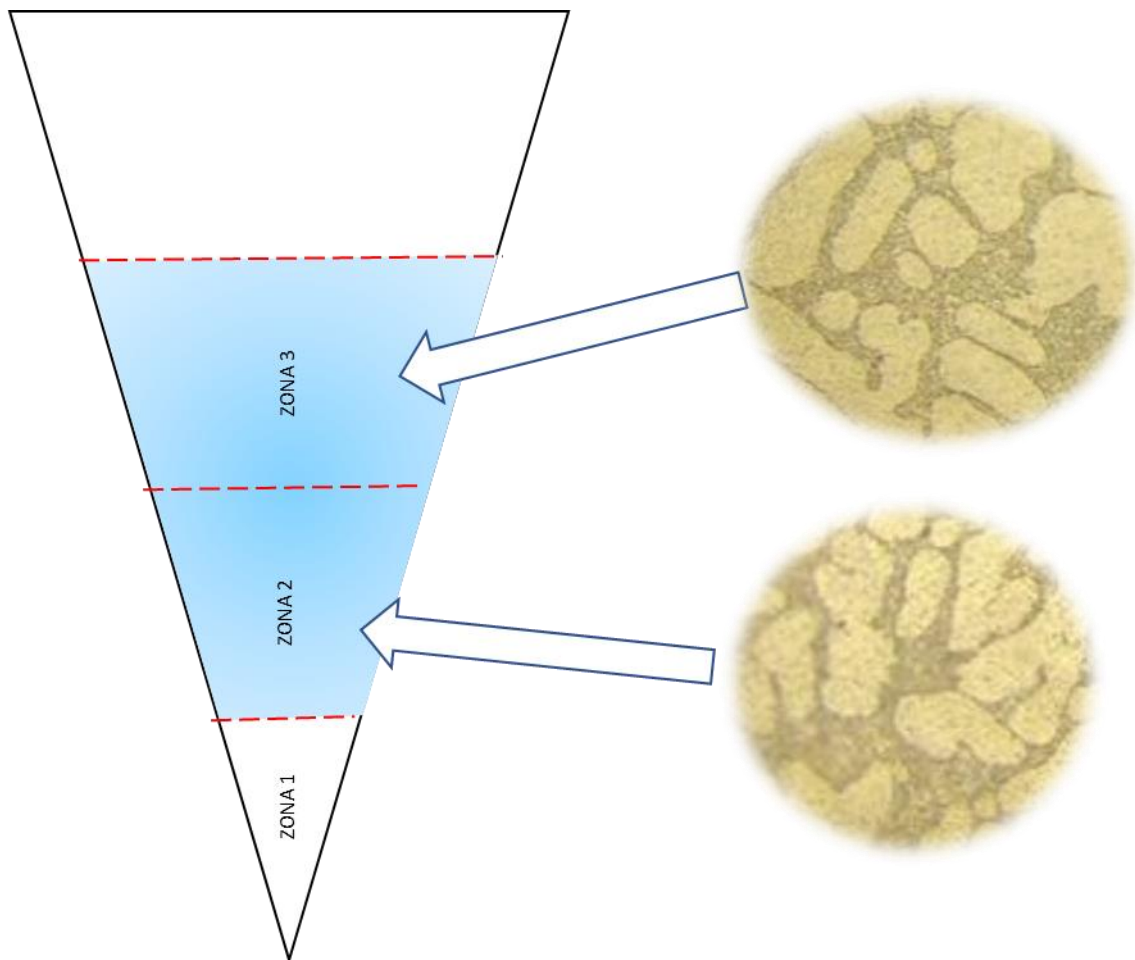


Figura 5.31 Microestructura de fase eutéctica A357 M3 (0.022% Sr)

En la **Figura 5.32** la aleación A357 con el porcentaje de Sr residual más alto (0.031%) se observa una estructura sobremodificada, lo cual ya no es deseable dentro de la industria metalúrgica.

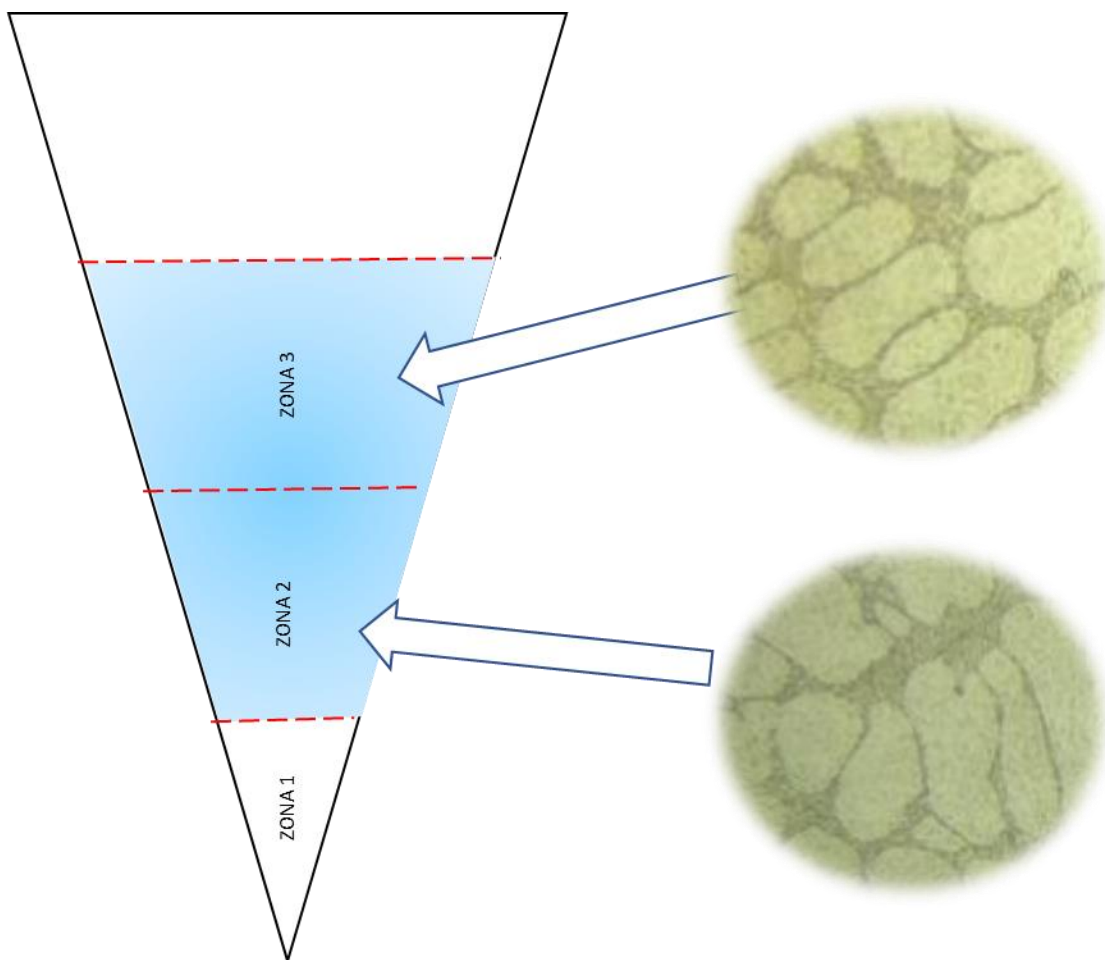


Figura 5.32 Microestructura de fase eutéctica A357 M4 (0.031% Sr)



A lo largo de las figuras (de **Figura 3.24** a la **3.32**) se observa una disminución evidente en el tamaño de grano (SDAS) y alteración en la morfología de la fase eutéctica a medida que el % de Sr residual aumenta. En la Tabla 5.5 y 5.6 (de acuerdo al comparativo con el **Anexo 1**) se tuvieron los siguientes niveles de modificación:

Tabla 5.5 Niveles de modificación por zonas de aleación 355

355	M0 Blanco	M1 (Sr 0.0012%)	M2 (Sr 0.0056%)	M3 (Sr 0.0113%)
Zona 3	Nivel 2 (Mal modificado)	Nivel 3 (Ligeramente modificado)	Nivel 4 (Suficientemente modificado)	Nivel 5 (Bien modificado)
Zona 2	Nivel 2 (Mal modificado)	Nivel 3 (Ligeramente modificado)	Nivel 4 (Suficientemente modificado)	Nivel 5 (Bien modificado)

Tabla 5.6 Niveles de modificación por zonas de la aleación A357

A357	M0 Blanco	M1 (Sr 0.009%)	M2 (Sr 0.013%)	M3 (Sr 0.022%)	M4 (Sr 0.031%)
Zona 3	Nivel 2 (Mal modificado)	Nivel 4 (Suficientemente modificado)	Nivel 5 (Bien modificado)	Nivel 5 (Bien modificado)	Nivel 6 (Super modificado)
Zona 2	Nivel 2 (Mal modificado)	Nivel 4 (Suficientemente modificado)	Nivel 5 (Bien modificado)	Nivel 5 (Bien modificado)	Nivel 6 (Super modificado)

En cuanto a la disminución del SDAS se generó la **Figura 5.33**, en la cual se observa claramente la tendencia de disminución del SDAS conforme aumenta el % de Sr residual (y por ende, el nivel de modificación) en la pieza. Incluso, en la zona 2 a niveles superiores de 0.01% de Sr residual el tamaño del SDAS comienza a ser similar al encontrado en un molde permanente (inferior a 25 micrómetros), por lo que las propiedades mecánicas, en comparación con aleaciones sin una buena modificación, son superiores. Esto también es debido al mecanismo dual de modificación, tanto químico como térmico, lo que contribuye a potenciar la modificación de la fase eutéctica en coladas con molde metálico (molde permanente).

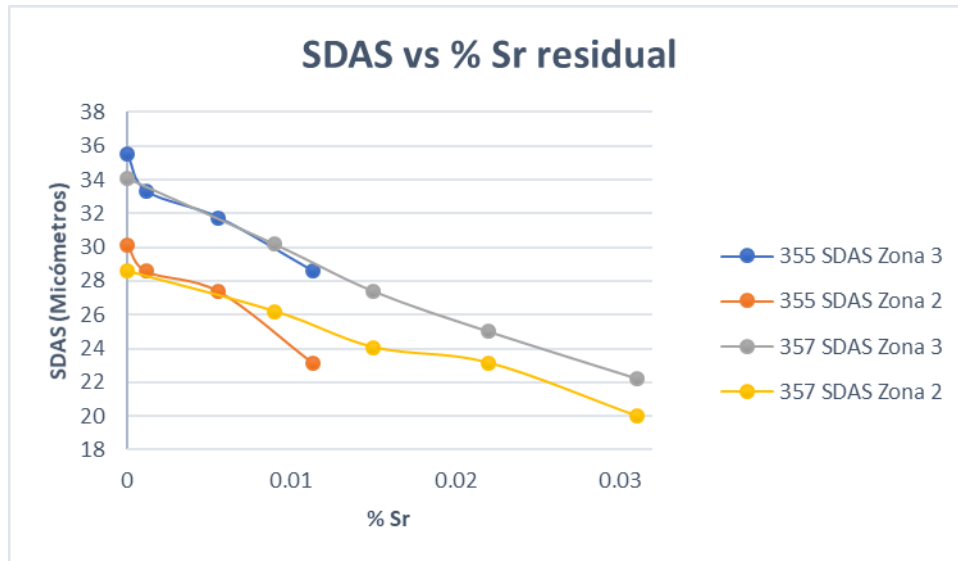


Figura 5.33 SDAS en micrómetros vs % de Sr residual en molde permanente

En la **Figura 5.34** se observa una gráfica representando los niveles de modificación versus en % de Sr residual, se observa la relación directa y proporcional en cuando al aumento en el nivel de modificación relacionado al aumento en el % de Sr residual presente en las piezas.

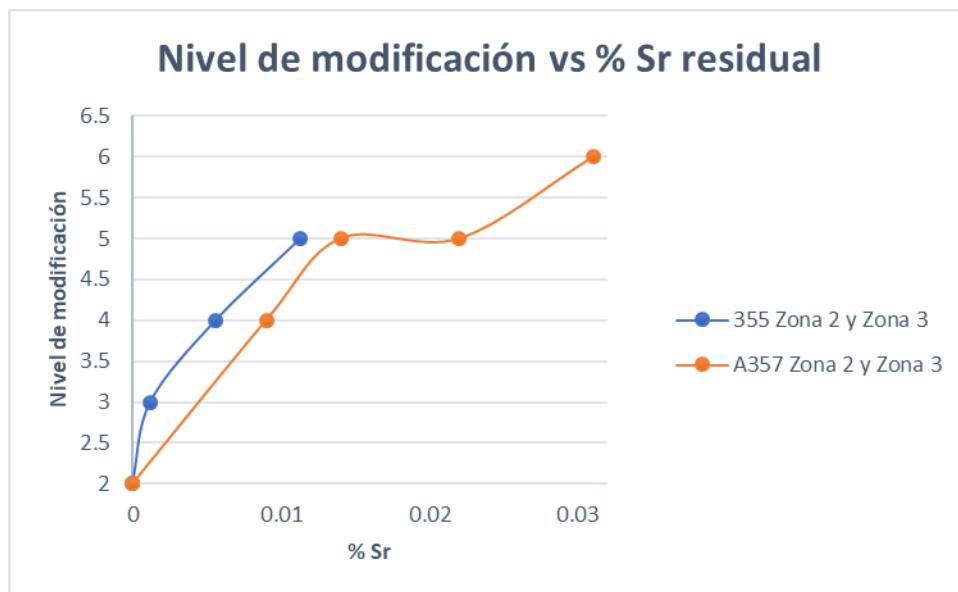


Figura 5.34 Nivel de modificación de aleaciones 355 y A357 vs % de Sr residual en molde permanente.



El blanco de la aleación 355 presentó una leve modificación la cual se debe a mecanismos de modificación térmicos, lo cual es normal dado el tipo de molde con el cual se trabaja, ya que presenta una conducción térmica mayor (Comparada con moldes no metálicos), lo que repercute en la velocidad de enfriamiento de la pieza. Se presentó una mayor modificación a medida de que el % de Sr residual aumentó, sin embargo, fue a un % menor comparado con la literatura con el cual la pieza alcanzó un nivel óptimo de modificación (Nivel 5 de modificación), es decir, a un 0.0113 %.

El blanco de la aleación A357 presentó, al igual que la aleación 355, una modificación térmica por el mismo mecanismo térmico dado por el molde permanente. Se requirió un % de Sr residual mayor dada la mayor cantidad de Silicio presente en la aleación y, por ende, mayor presencia de fase eutéctica que era necesaria modificar. De acuerdo a los experimentos, fue necesario un 0.013% de Sr residual para obtener un nivel de modificación óptimo (Nivel 5), incluso llegando hasta a porcentajes de 0.022 % de Sr se sigue teniendo una buena modificación (Pero no es lo indicado como se presentará más adelante en el análisis económico). Es a partir de 0.031% de Sr residual cuando se comienza a tener una supermodificación, lo cual ya no es indicado para las piezas coladas (además que eleva el costo de producción en gran medida).

5.3) Análisis económico

Las repercusiones económicas en aquellas empresas que fabriquen aleaciones y apliquen el tratamiento del metal líquido denominado “modificación eutéctica” se basan en la literatura para aplicar los siguientes porcentajes de modificación a las aleaciones 355 y A357:

- Para aleaciones de aluminio aplican, en promedio, un 0.025% de Estroncio. [20]

Esto se maneja en porcentajes dado que varía la carga de los distintos hornos que existen en la industria. Generalmente son de 20 y 50 Toneladas Métricas (TM), aunque existen hornos pequeños desde 1 a 15 TM.

Para generalizar los resultados (ecuaciones 3 a 6), suponiendo un horno de 30 TM se hicieron los siguientes cálculos para poder realizar la Tabla 5.1 y tener una comparativa visual.

Para la aleación 355, suponiendo una diferencia entre el nivel mínimo para tener una buena modificación con base en los resultados (0.011% de Sr) contra lo utilizado en empresas como Almeda o General Motors, teniendo una eficiencia del 90%.



$$30,000 \text{ Kg Al a modificar } \left(\frac{0.025 - 0.011}{100} \right) \\ = 4.2 \text{ Kg de Sr ahorrados para modificar a nivel óptimo}$$

$$4.2 \text{ Kg de Sr } \left(\frac{1 \text{ Kg aleación Al Sr}}{0.101 \text{ Kg de Sr}} \right) \left(\frac{100}{90} \right) = 46.20 \text{ Kg de Aleación para modificar}$$

Tomando en cuenta que anualmente una empresa con volúmenes altos de producción, fabrica aleaciones modificadas 50 veces al mes y al año tiende a parar producción al menos durante dos meses por distintos factores tanto técnicos o económicos, se tiene que anualmente colarían 500 veces un horno de 30 TM. Fijando el valor de 7.65 USD/Kg de aleación Al-10%Sr, para no variar el consumo mensual, se tendría que:

$$46.20 \text{ Kg } \left(\frac{7.65 \text{ USD}}{\text{Kg}} \right) (500 \text{ Coladas al año}) = \$176,715 \text{ USD de ahorro anuales}$$

Haciendo el mismo procedimiento para la aleación A357, tenemos que, suponiendo una diferencia entre el nivel mínimo para tener una buena modificación con base en los resultados (0.015% de Sr) contra lo utilizado actualmente en la industria (0.026% Sr)

$$30,000 \text{ Kg Al a modificar } \left(\frac{0.028 - 0.013}{100} \right) \\ = 4.5 \text{ Kg de Sr necesarios para modificar}$$

$$4.5 \text{ Kg de Sr } \left(\frac{1 \text{ Kg aleación Al Sr}}{0.101 \text{ Kg de Sr}} \right) \left(\frac{100}{90} \right) = 49.50 \text{ Kg de Aleación para modificar}$$

Tomando en cuenta que anualmente una empresa con volúmenes altos de producción, fabrica aleaciones modificadas 50 veces al mes y al año tiende a parar producción al menos durante dos meses por distintos factores tanto técnicos o económicos, se tiene que anualmente colarían 500 veces un horno de 30 TM. Fijando el valor de 7.65 USD/Kg de aleación Al-Sr, para no variar el consumo mensual, se tendría que:

$$49.50 \text{ Kg } \left(\frac{7.65 \text{ USD}}{\text{Kg}} \right) (500 \text{ Coladas al año}) = \$189,337.5 \text{ USD de ahorro anuales}$$

En el caso de la aleación 355 el ahorro anual corresponde a un 44% del costo real que tienen actualmente, lo que generaría una ventaja respecto a su competencia.

En el caso de la aleación 357 el ahorro corresponde a un 46.42% de ahorro anual, se traduce en una gran ventaja en el área comercial de cualquier empresa.

En ambos casos el ahorro repercute directamente en costo de producción, sin embargo, esto se traduce también en tiempos de producción, horas hombre,



margen de ganancia (al mantener precio de venta teniendo un costo de producción menor), ahorro en área de almacén, ahorro en costos logísticos, etc. La lista de impactos favorables se extiende a todas las áreas de la empresa.



Capítulo VI

Conclusiones.

El porcentaje idóneo de estroncio residual para un correcto nivel de modificación (nivel 5) en una aleación 355 es de 0.011% colada en molde permanente.

La aleación A357, al poseer un contenido de Silicio mayor, demanda una cantidad de estroncio residual mayor para alcanzar un nivel de modificación óptimo (0.013% de Sr residual) colada en molde permanente.

El efecto de la modificación de la fase eutéctica se ve favorecida en las coladas en las cuales se usa molde metálico, ya que, dado que la velocidad de transferencia de calor es mayor, existe un gradiente térmico que promueve la modificación de la fase eutéctica

Al aplicar las cantidades idóneas en altas producciones de aleaciones modificadas, supone un ahorro entre un 44% (aleación 355) y un 46.42% (aleación A357) de acuerdo a la aleación fabricada.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Alaya Cázares José,(2014) *Estudio De La Formación De Porosidad En Una Aleación De Aluminio 356*. Tesis de maestría, UANL.
- [2]. Guevara Maffia Ernesto. (2013) *Aluminio y sus aleaciones*,
- [3]. “Effect of silicon content in mechanical properties of aluminum alloy”, Husain Mehdi, Meerut Institute of Technology.
- [4]. “Assessment of modification level of hypoeutectic Al -Si alloys by pattern recognition of cooling curves”, CHEN Xiang, GENG Hui-yuan, LI Yan-xiang, 2005.
- [5]. <https://www.iea.org/tcep/industry/aluminium/> 20/Julio/ 2019 18:05 horas
- [6]. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/aluminum-statistics-and-information> 20/Julio/2019 19:50
- [7]. <http://www.world-aluminium.org/statistics/> 21/Julio/2019 15:30
- [8]. “The role of strontium in modifying aluminium–silicon alloys”, Timpel, Wanderka, Yammamoto, Banhart, 2012.
- [9]. Tesis “Estudio De La Demanda De Sr (Estroncio) Como Modificador En Aleaciones Al-Si Hipoeutéticas Y Eutéctica”, José Antonio Mejía, 2016.
- [10]. “Tratado práctico de fundición”, Howard E.D., Madrid, 1962.



- [11]. “Fundición para ingenieros”, Howard F. Taylor, Flemings Merton C., Instituto Tecnológico de Massachusetts, New Yoek, 1961
- [12]. “Handbook of Aluminum: Volume 1”, Totten George E. MacKenzie D. Scot, Marcel Dekker, New York, 2003.
- [13]. “Strontium modification of aluminum alloy castings in expendable pattern casting process”, Wang, Shivkumar, Department of mechanical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, USA.
- [14]. www.revistacomercioexterior.com/articulo.php?id=120&t=la-industria-del-aluminio-en-mexico 02/Julio/2019 11:00
- [15]. “Effect of iron on the microstructure and mechanical property of Al–Mg–Si–Mn and Al–Mg–Si diecast alloys”, Yang, Watson, Fan, Ji, 2013. USA.
- [16]. “The role of strontium in modifying aluminium-silicon alloys”, Timpel, Wanderka, Yamamoto, Lazarev, 2012, Germany, USA.
- [17]. “Eutectic grains in unmodified and strontium-modified hypoeutectic aluminum-silicon alloys”, McDonald, Dahle, John, 2004. USA.
- [18]. “On-line prediction of aluminum–silicon eutectic modification level using thermal analysis”, Djurvdjevic, Sokolowsky. 2001, Russia.
- [19]. “Modification in the aluminum silicon system”, Hannah, Lu, Hellawell, 1984. USA.
- [20]. “The aluminum–silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography”, Makholuf, 2001, USA.

ANEXO 1

1
Estructura sin modificar
El Silicio está presente como
láminas largas, gruesas y en
forma acicular



2
Estructura mal modificada
El Silicio está presente en su mayoría
en forma de láminas finas y también en
forma acicular



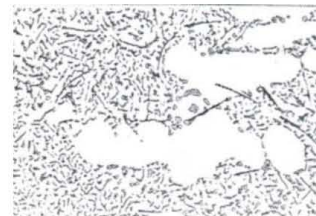
3
Estructura ligeramente modificada
La estructura laminar empieza a
romperse en pequeñas partes,
aunque todavía existen algunas
estructuras aciculares.



4
Estructura suficientemente modificada
La estructura laminar se ha fracturado
completamente, pero pequeñas
cantidades de fase acicular permanecen.



5
Estructura bien modificada
El Silicio está presente en forma de
partículas fibrosas redondeadas.



6
Estructura supermodificada
El Silicio está presente en forma
de partículas globulizadas pero
extremadamente finas.



7
Estructura sobremodificada
Los granos de Aluminio tiene
forma de onda, las partículas de
Silicio son gruesas mostrando
partículas fibrosas de Silicio,
presentandose en la estructura





Anexo II

Aleación	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Ti
355.0	4.5-5.5	0.6	1.0-1.5	0.5	0.40-0.60	0.25
A357.0	6.5-7.5	0.20	0.20	0,10	0.40-0.70	0.04-0.20

Tabla de análisis químicos típicos para aleación 355 y A357 (ASM)
Metals Handbook Vol. 02



Anexo III

Tablas con las mediciones realizadas del SDAS.

Muestra	355 M0	355 M1	355 M2	355 M3
Zona 1	33.33, 40, 33.33.	33.33, 33.33, 33.33	33.33, 33.33, 28.57	28.57, 28.57, 28.57
Zona 2	28.57, 28.57, 33.33	28.57, 28.57, 28.57	28.57, 28.57, 25	22.22, 22.22, 25

Muestra	A357 M0	A357 M1	A357 M2	A357 M3	A357 M4
Zona 1	33.33, 33.33, 40.	28.57, 28.57, 33.33	28.57, 28.57, 25.	25, 25, 25	22.22, 22.22, 22.22
Zona 2	28.57, 28.57, 28.57	28.57, 25, 25.	25, 25, 22.22	22.22, 22.22, 25	20, 20, 20